Proceedings

2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference

IESTEC 2022

Proceedings

2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference

19–21 October 2022
Panama, Panama City

Los Alamitos, California

Washington • Tokyo

IEEE COMPUTER SOCIETY

Copyright © 2022 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All rights reserved.

Copyright and Reprint Permissions: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries may photocopy beyond the limits of US copyright law, for private use of patrons, those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided that the per-copy fee indicated in the code is paid through the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.

Other copying, reprint, or republication requests should be addressed to: IEEE Copyrights Manager, IEEE Service Center, 445 Hoes Lane, P.O. Box 133, Piscataway, NJ 08855-1331.

The papers in this book comprise the proceedings of the meeting mentioned on the cover and title page. They reflect the authors' opinions and, in the interests of timely dissemination, are published as presented and without change. Their inclusion in this publication does not necessarily constitute endorsement by the editors, the IEEE Computer Society, or the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

BMS Part Number CFP22S69-ART
ISBN 978-1-6654-9843-2

Additional copies may be ordered from:

IEEE Computer Society
Customer Service Center
10662 Los Vaqueros Circle
P.O. Box 3014
Los Alamitos, CA 90720-1314
Tel: + 1 800 272 6657
Fax: + 1 714 821 4641
http://computer.org/cspress
csbooks@computer.org

IEEE Service Center
445 Hoes Lane
P.O. Box 1331
Piscataway, NJ 08855-1331
Tel: + 1 732 981 0060
Fax: + 1 732 981 9667
http://shop.ieee.org/store/
customer-service@ieee.org

IEEE Computer Society
Asia/Pacific Office
Watanabe Bldg., 1-4-2
Minami-Aoyama
Minato-ku, Tokyo 107-0062
JAPAN
Tel: + 81 3 3408 3118
Fax: + 81 3 3408 3553
tokyo.ofc@computer.org

Individual paper REPRINTS may be ordered at: <reprints@computer.org>

Editorial production by Lisa O'Conner
Cover art production by Hector Torres

IEEE Computer Society
***Conference Publishing Services* (CPS)**
http://www.computer.org/cps

2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)

IESTEC 2022

Table of Contents

Message from the General Chair ..... **xxii**
Message from the Scientific Committee Chair ..... **xxiii**
Committees ..... **xxiv**
Reviewers ..... **xxvii**
Sponsors ..... **xxix**

LIBS - Logistics, Innovation and Management Science

Impact of Industrial Maintenance on the Supply Chain in a Textile Company in Times of Pandemic 1
Brenda Lorena Flores Hidalgo (UPIICSA-Instituto Politécnico Nacional, México), Juan José Hurtado Moreno (UPIICSA-Instituto Politécnico Nacional, México), and M. en C. José Manuel García Córdova (UPIICSA-Instituto Politécnico Nacional, México)

Monorails, Unconventional Railway Technologies: A Review 9
Aranzazu Berbey-Alvarez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Rony Caballero (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Felix Henríquez-Espinosa (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Warehouse Management Model Integrating BPM-Lean Warehousing to Increase Order Fulfillment in Sme Distribution Companies 17
Kevin Luis Ambrosio-Flores (Universidad de Lima, Perú), María Lazo-de-la-Vega-Baca (Universidad de Lima, Perú), Juan Carlos Quiroz-Flores (Universidad de Lima, Perú), and Ezilda Cabrera-Gil-Grados (Universidad de Lima, Perú)

Increased Inventory Turnover Through a Lean Warehousing Management Model in SMEs Suppliers to the Food Industry 25
Sharon Cynthia Espino-Sanchez (Universidad de Lima, Perú), Andrea Ximena Vasquez-Ortiz (Universidad de Lima, Perú), and Juan Carlos Quiroz-Flores (Universidad de Lima, Perú)

Business Management Model to Reduce the Sales Cycle in Software Development SMBs Using BPM, CRM, and SCRUM 32
Valeria Tellez-Risco (Universidad de Lima, Peru), Juan Jose Vela-Linares (Universidad de Lima, Peru), Juan Carlos Quiroz-Flores (Universidad de Lima, Peru), and Alberto Flores-Pérez (Universidad de Lima, Peru)

Production Management Model Based on Lean and DDMRP Tools to Increase the Rate of Project Compliance in Manufacturing SMEs in the Metalworking Sector 38
Anthony Gonzales-Romero (Universidad de Lima, Perú), Ibett Johana Huamani-Martinez (Universidad de Lima, Perú), Juan Carlos Quiroz-Flores (Universidad de Lima, Perú), and Bertha Haydee Diaz-Garay (Universidad de Lima, Perú)

Technological Innovation and Performance of MSMEs in Panama: Study in Times of Covid-19 46
Bolívar Bernal Mojica (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Nuvia Gisela Martez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Enith González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Gabriel Vergara (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Edilsa Q. de Sanfilippo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

The Relationship Between International Tourism Arrivals and Receipts in the Americas 53
Yovani Edgar Chávez Rodríguez (Metropolitan University of Education, Science, and Technology (UMECIT), Panama)

Production Management Model Based on Lean Manufacturing and BPM Tools to Increase Profitability in SMEs in the Plastic Sector 61
Christian Fernandez-Albujar (Universidad de Lima, Peru), Leslie La Rosa-Arizaga (Universidad de Lima, Peru), and Alberto Flores-Perez (Universidad de Lima, Peru)

Optimization Design for Picking Times Through 5S, ABC Model and Cycle Counting in a Sanitary Company 68
Maria Gracia Tineo-Morales (Universidad de Lima, Peru), Sebastian Garcia-Angulo (Universidad de Lima, Peru), and Alberto Flores-Perez (Universidad de Lima, Peru)

Reduction of Order Delivery Time Using Kanban, TPM and 5S in a Peruvian Textile Factory. an Empirical Review 73
Francesca Maria Jarufe-Majluf (Universidad de Lima, Perú.), Alvaro Paredes-Carrasco (Universidad de Lima, Peru.), Alberto Flores-Perez (Universidad de Lima, Peru), and Martin Collao-Diaz (Universidad de Lima, Peru)

Study of the Cocoa Supply Chain in the Region of Bocas Del Toro, Panama 79
Nuvia Gisela Martez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Danilo Toro Lozano (Universidad Tecnológica de Panamá Panamá, Panamá), and María Luisa Singh Gustavino (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Production Management Model Based on Lean Manufacturing and SPL to Increase Productivity in Clothing SMEs 87
Anderson Liberato-Arenas (Universidad de Lima, Perú) and Martin Collao-Diaz (Universidad de Lima, Perú)

How Equipment Impacts World Class Manufacturing. 92
Jorge Alberto Bonilla Cedeño (University of Costa Rica, Costa Rica)

Design for the Manufacture of a Product: Modular Device for Cleaning Glass Shutters 100
Sergio Gonzalez-Serrud (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Digital Maturity Level in Small and Medium-Sized Enterprises in Panama 108
Ricardo Caballero (Universidad Tecnológica de Panamá), Rolando Olmos (Universidad Tecnológica de Panamá), and Nathalia Martinez (Universidad Tecnológica de Panamá)

INCB - Infrastructure, Construction and Buildings

Conceptual Model to Reduce Non-Contributory Time Based on Lean Tools in the Construction Industry in Peru 116
Olenka Cabrera (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú), Joselyn Tejeda (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú), José Llontop (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú), José C. Alvarez (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú), and Sevilay Demirkesen (Gebze Technical University, Turkey)

Experimental Study of Angle-Type Shear Connectors Welded to Steel Beams and Embedded in Reinforced Concrete Slabs 122
Marcelo Fernado Castañeda Vilatuña (Escuela Politécnica Nacional, FICA, Ecuador), Brayan Alejandro Vera Vélez (Escuela Politécnica Nacional, FICA, Ecuador), Luis Tinerfe Hernández Rodríguez (Escuela Politécnica Nacional, FICA, Ecuador), Diego Armando Arevalo Chafuel (Escuela Politécnica Nacional, FICA, Ecuador), Gabriel Edmundo Velastegui Balda (Escuela Politécnica Nacional, Laboratorio de soldadura, Ecuador), and Edwin Eduardo Guaminga Pillajo (Escuela Politécnica Nacional, FICA, Ecuador)

Acceptability of the Bicycle as Alternative Transport in the Financial Sector of Quito in the Context of the COVID 19 Pandemic 130
Fredi Augusto Paredes Vásquez (Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador), Víctor Andrés Núñez Pugarín (Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador), and Susana Masapanta-Carrión (Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador)

Real-Time Hybrid Simulation: Application to the Evaluation of the Dynamic Behavior of a Building with Reinforced Concrete Thin Walls and Non-Connected Seismic Isolators 138
Bryan Castillo Torres (Universidad Del Valle, Colombia), Sharick Vides Quintero (Universidad Del Valle, Colombia), Johannio Marulanda Case (Universidad Del Valle, Colombia), and Peter Thomson (Universidad Del Valle, Colombia)

Correlation Between Characteristic Properties and Chloride Content in Existing Reinforced Concrete Structures with Different Levels of Exposure in Panama 146
Javier Lozano (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jesús Serrano (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Ramiro Vargas (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Minimum Safety Criteria in the Design Stage of Supported and Suspended Scaffolding 154
Cristel Julissa Cedeño Martínez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Yarleny Jurieta Mc Naughton Perea (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), and Milagros Pinto Nuñez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

Pysvae: "A Simple Python Code for Soil Vibration Analysis for Earthquake Engineering." 162
Cristhian Caballero (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Bruno Moreno (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Stephania Rodriguez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), and José Gallardo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

Lateral Capacity of Piles in Clayey Soils with Bilinear Strength Profile 170
Francisco Grajales-Saavedra (Universidad Tecnologica de Panamá, Republic of Panama) and Yesica Yau (Universidad Tecnológica de Panamá, Republic of Panama)

Correlation of Soil Properties and Electrical Resistivity as an Indicator of Erosion Potential Using the Hole Erosion Test (HET) 176
Edgar Ortega (Universidad Tecnologica de Panama, Panama), Michelle Lee Barry (University of Arkansas, USA), and Francisco Grajales-Saavedra (Universidad Tecnologica de Panama, Panama)

Lateral Human-Structure Interaction in a Flexible Structure Through Hybrid Simulation 184
J. F. Gil (Universidad del Valle, Colombia), B. Castillo (Universidad del Valle, Colombia), and P. Thomson (Universidad del Valle, Colombia)

Three-Dimensional Model with Inverse Dynamics of Human Gait: Reaction Forces on Rigid Surface 190
Juan Diego Aux (Universidad del Valle, Colombia), Bryan Castillo (Universidad del Valle, Colombia), Johan Arana (Universidad del Valle, Colombia), and Peter Thomson (Universidad del Valle, Colombia)

ISIT - Intelligent Systems and ICTs

Study on Technologies Implemented in the Area of Mental Health for Older Adults Post-Covid-19 197
Nila Navarro (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Denis Cedeno-Moreno (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Novel Deployable Landing System for UAV Based on the Tensegrity Principle 204
Andres Gonzalez-Fallas (Universidad Latina de Costa Rica, Costa Rica)

Prediction of "Bad Postures" Based on Machine Learning Models 208
Luis Fernando Gómez Mendoza (Universidad Nacional de Ingeniería, Perú), Sofía Huamán Vizconde (Universidad Nacional de Ingeniería, Perú), José Luis Castillo Sequera (Universidad de Alcalá, España), and Jimmy Aurelio Rosales Huamaní (Universidad Nacional de Ingeniería, Perú)

Digitalized Academic Exam Evaluation System, Using Deep Learning and Computer Vision 215
Angel Espinosa (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Jose Carlos Rangel (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Partial Discharge Detection in Power Lines Using Automated Machine Learning 223
Jannery Rivas (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Carlos Boya-Lara (Universidad Interamericana de Panamá, Panamá), and Héctor Poveda (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

A Systematic Review of the Software Architectures for the Development of Mobile Applications in Education 231
Dimas Hernán Concepción Patiño (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Lilia Muñoz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Vladímir Villarreal (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and César Pardo (Universidad del Cauca Popayán, Colombia)

Proposal for the Evaluation of the Quality of the Metadata for a Research Data Repository 238
Juliette Morales (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Lilia Muñoz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Amaly Fong (Universidad Marítima de Panamá, Panamá)

Approach to Optimize Energy Production and Demand Using Systems of Inequalities and Regression Modeling 244
Ivonne Nunez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Elia Cano (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Carlos Rovetto (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Edmanuel Cruz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Andrzej Smolarz (Lublin University of Technology, Panamá), and Juan Jose Saldana-Barrios (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Social Media, Emotions and Technology: Identifying Possibilities and Attitudes During the COVID-19 Pandemic 251
Ismael Camargo-Henríquez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Yarisel Núñez-Bernal (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Design and Implementation of a Framework for Remote Experiments in Education 258
Pavel Kuriščák (Charles University; Laboratory of General Physics Education, Czech Republic), Pedro Rossa (Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Portugal), Horácio Fernandes (Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Portugal), and João Nuno Silva (Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, INESC-ID Lisboa, Portugal)

Social Media and Its Importance in Digital Communication, Before, During and After the COVID Era: Case of Panama 266
Jayguer Vasquez Torres (Universidad Tecnológica de Panamá), Clifton Clunie (Universidad Tecnológica de Panamá), and Luis Joyanes Aguilar (Fundación I+D del Software Libre (Fidesol), (España))

Availability and Use of ICTs in Rural Areas in Panamá: Tulú Case Study 273
Yarisel Núñez-Bernal (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Ismael Camargo-Hernríquez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José Isaza-Gonzalez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Juan Castillo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Epidemiological Modeling with Sir and Arima Dynamic Models and Machine Learning to Predict the Future Behavior of Covid-19 in Panama 279
Roberto Castillero (Licenciatura en Ingeniería Industrial y Mecánica Industrial-Facultad de Ingeniería Industrial-Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jaime Esquivel (Licenciatura en Ingeniería Industrial y Mecánica Industrial-Facultad de Ingeniería Industrial-Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Humberto Alvarez (Departamento de Producción - Facultad de Ingeniería Industrial-Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Víctor López (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

EESS - Engineering Education and Social Sciences

WPA-Achievements of an International Alliance in the Midst of a Pandemic 287
Aris Castillo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Guadalupe González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José Calvo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Horacio Fernández (Instituto de Plasma e Fusao Nuclear, Instituto Técnico de Lisboa, Panamá), and Elida de Obaldia (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Development of Software Projects in Thesis Using an Agile Methodology 293
Gustavo A. Rivera S. (Universidad Libre, Colombia), Pedro A. Forero S. (Universidad Libre, Colombia), Fredys A. Simanca H. (Universidad Libre, Colombia), and Fabian Blanco G. (Universidad Libre, Colombia)

The Hidden Physics Behind a Pendulum 299
Horacio Fernandes (Instituto Superior Tecnico, Portugal), Filipe Dias (Centro Ciência Viva Algarve, Portugal), Rafael Henriques (Instituto Superior Tecnico, Portugal), Elida Obaldia (Universidade Tecnologica Panama, Panama), Pedro Rossa (Instituto Superior Tecnico, Portugal), and Manuel B. Santos (Instituto Superior Tecnico, Portugal)

Bringing the WPA@ELAB Pendulum Network Closer to Secondary Education 303
Carola Hernández (Universidad de Los Andes, Colombia), Cristian Yesid Moreno (Universidad de Los Andes, Colombia), Ricardo Chavarro (Carlos Abondano Gonzalez, Colombia), Carlos Francisco Rodriguez (Universidad de Los Andes, Colombia), and Sofia Moncayo (Universidad de Los Andes, Colombia)

World Pendulum Alliance: An Apparatus Performance Analysis 309
Junio M. R. Cruz (Instituto de Física, (UnB), Brazil), Horacio Fernandes (Instituto Superior Técnico (IST), U.Lisboa, Portugal), Gesil S. Amarante-Segundo (Univ. Estadual de Santa Cruz (UESC), Brazil), Cassio H. S. Amador (Univ. Tecnológica Federal do Paraná, Brazil), Raquel S. Brito (Instituto de Física (UnB), Brazil), Bernhard G. Enders (Faculdade de Planaltina (UnB), Brazil), Pedro A. Mendes Rossa (Instituto Superior Técnico (IST), U.Lisboa, Portugal), Manuel Santos (Instituto Superior Técnico (IST), U.Lisboa, Portugal), and Rafael Henriques (Instituto Superior Técnico (IST), U.Lisboa, Portugal)

Perception of Sustainable Development Goal 6 Progress in the Metropolitan Area of Panama 316
Yazmin L. Mack-Vergara (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama) and Michelle Ruíz (Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP, Panama)

Profile of Applicants Who Did Not Use the ALEKS Smart Tutor to Prepare for the Entrance Exam to the Technological University of Panama in 2018 324
Javier E. Sanchez-Galan (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá; Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá), Norma Miller (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Giancarlo Roach-Rivas (Universidad de Panamá, Panamá)

Environmental Management and ICT for Sustainable Development in Universities 330
Patricia Alexandra Albuja Mariño (Universidad Tecnológica Israel, Ecuador), Paúl Francisco Baldeón Egas (Universidad Tecnológica Israel, Ecuador), Henry Recalde (Universidad Tecnológica Israel, Ecuador), and Renato Toasa (Universidad Tecnológica Israel, Ecuador)

Impact of the Use of Virtual SEDI Platform in the Reeducation of Children with Dyslexia in a Primary Educational Center 337
Maria Diaz-Quintero (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Kexy Rodriguez-Martinez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Natividad Quintero-Fuentes (Universidad Especializada de las Américas, Panamá)

Application of an Inquiry-Based Learning Space (ILS) GRAASP in the Course of Differential Equations for Engineering Students Within the Framework of the Project Wp@ELAB 342
Dayana Barrera-Buitrago (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologìa e Ingenierìa), Nidia Lugo López (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologìa e Ingenierìa), Freddy Torres-Payoma (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologìa e Ingenierìa), Diana Carolina Herrera (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologìa e Ingenierìa), Francesc Alpiste Penalba (Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech, Spain), Jordi Torner Ribé (Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech, Spain), and Laura Daniela Neira-Quintero (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologìa e Ingenierìa)

Construction and Implementation of a Go-Lab Inquiry Learning Space for Teaching Energy Conservation in Engineering and Technology Programs in General Physics Course 347
Freddy Alexander Torres Payoma (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia), Diana Carolina Herrera Muñoz (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia), Diana Lorena Tique Escobar (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia), Dayana Alejandra Barrera Buitrago (Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia), and Francesc Alpiste Penalba (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain)

Computational Thinking, a Discipline to Enhance Digital Skills Such as Programming 354
Yen Caballero-Gonzalez (Instituto Técnico Superior Especializado, Panamá; Universidad de Salamanca, Facultad de Educación)

World Pendulum Alliance: Student's First Impressions in Brazil 360
Gesil S. Amarante-Segundo (Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Brazil), Beatriz G. Amarante (Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Brazil), Junio M. R. Cruz (Universidade de Brasília (UnB), Brazil), Alice M. Ribeiro (Universidade de Brasília (UnB), Brazil), Cassio H. S. Amador (Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brazil), and Horário Fernandes (Universidade de Lisboa, Portugal)

Metrics for Techno-social Innovation Management in Higher Education 364
Sidia Moreno (Universidad Tecnológica de Panamá, CINEMI, Panamá), Bolívar Bernal (Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Industrial, Panamá), Juan Manuel Montes Hincapie (Universidad de Medellín, Colombia), and Zoila Yadira Guerra de Castillo (Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Industrial, Panamá)

BBBA - Biosciences, Biotechnology, Biomedicine and Agro-industries

Ipeti River's Water Quality Based on the Aquatic Macroinvertebrates Community 370
Kleveer Espino (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Ulises Jiménez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Equine Surface Temperature Before and After Exercise Using Thermographic Images 376
Rafaella Resende Andrade (University of Florence/UNIFI, Italy), Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz (Federal University of Lavras, Brazil), Diego Bedin Marin (University of Florence/UNIFI, Italy), Gabriel Araújo e Silva Ferraz (Federal University of Lavras, Brazil), Raquel Silva de Moura (Federal University of Lavras, Brazil), Rodrigo Norberto Pereira (Federal University of Lavras, Brazil), Matteo Barbari (University of Florence/UNIFI, Italy), and Giuseppe Rossi (University of Florence/UNIFI, Italy)

Healing Plants in the Traditional Medicine of the Ngäbe-Buglé Ethnic Group: A Preliminary Ethnobotanical Study 381
José Ulises Jiménez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Kleveer Abilio Espino Cedeño (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José Rogelio Fábrega Duque (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Abelardo del Carmen Franco Chávez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Wedleys Walker Tejedor Espinosa (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Brenda Cecilia Serracín (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Dafni Y. Mora G. (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Ana Cristina González Valoys (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Human Resources in the Food Agroindustry in Panama 387
Wedleys Tejedor-Espinosa (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Yamileth Pittí-Pinzón (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Victor Guillén-Pérez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Bolívar Bernal-Mójica (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Celinda Pérez-De León (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Ricardo Caballero-González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Design and Construction of a Multiparameter Instrument Prototype for Continuous Remote Monitoring of Physical Variables 393
Sorhay Vasquez (Universidad Especializada de las Américas, República de Panamá), Manuel Batista (Universidad Especializada de las Américas, República de Panamá), Luys Santana (Nubelab Technologies, S.A., Calle 53 y Avenida Balboa, Ciudad de Panamá, República de Panamá), Bernardo Guerrero (Universidad de Panamá, República de Panamá), Roberto Morales (University of London, United Kingdom), Javier Sánchez Galán (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama; Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá), Ericka Matus (Universidad Especializada de las Américas, República de Panamá; Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá), and Jay Molino (Universidad Especializada de las Américas, República de Panamá; Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá)

ADHD Treatment in Adults Through a Virtual Reality Game 398
Ana Alvarez-Suarez (Universidad Militar Nueva Granada, Colombia) and Oscar I. Caldas (Universidad Militar Nueva Granada, Colombia)

Design and Implementation of an Experimental Cultivation Chamber with LED Lights and Preliminary Tests with Lettuce (Lactuca Sativa L.) 405
Victor Guillén Pérez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jorge Serrano R. (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Yamileth Pittí Pinzón (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Héctor Rosales (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Effect of the Type of Fermenter on the Cocoa Fermentation Process and Quality of the Cacao Beans 413
Darla Calderon (Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá), Wedleys Tejedor (Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá), Orlando Melgar (Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá), and Abelardo Franco (Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá)

Assessment of Saccharum Spontaneum L. Biochar Potential for Soil Improvement 420
Josué Prens (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Joisleen Ramírez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Arthur James (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Zohre Kurt (Middle East Technical University, Turkey), and José E. Villarreal (Investigador Agrícola Jefe del Laboratorio de Fertilidad de Suelo, IDIAP – CIA Divisa – Carretera Panamericana Panamá, Panamá)

Preliminary Evaluation of the Content of Heavy Metals in Rural Aqueducts of the District of TonosÍ, Province of Los Santos, Panama 426
Dina Henríquez-Rivera (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Kathia Broce (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jorge Olmos (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Yahaira Espinosa (Universidad de Panamá, Panamá)

On Understanding the Role of Exoskeleton Robots in Hand Rehabilitation: A Brief Review 432
Antonio Alberto Jaén Ortega (Universidad Tecnológica de Panamá), Maria De Los Angeles Ortega Del Rosario (Universidad Tecnológica de Panamá), Per Hellström (Mälardalen University, Division of Intelligent Future Technologies), Elaine Åstrand (Mälardalen University, Division of Intelligent Future Technologies), and Mikael Ekström (Mälardalen University, Division of Intelligent Future Technologies)

ENEN - Energy and Environments

Coastline Changes in the Pacific of Panama Due to Coastal Erosion 440
Esther Rodríguez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Gabriela Ávila (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Gisselle Guerra-Chanis (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Using Principal Component Analysis to Evaluate Meteorological Data of Panama Bay Mangroves. 445
Nathalia Tejedor Flores (Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá; Sistema Nacional de Investigación, Panama), Ruth González (Universidad de Panamá, Panama), and Mitzi Cubilla-Montilla (Universidad de Panamá; Sistema Nacional de Investigación, Panama)

What Environmental Sustainability Practices Do Universities Manage for Sustainable Development 453
Mitzi Cubilla-Montilla (Universidad de Panamá, Panamá), Carlos Torres-Cubilla (Banco General, Panamá), and Nathalia Tejedor-Flores (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Evaluation of the Microbial Degradation of Phenanthrene and Pyrene in Wastewater 458
Marta Ruiz-Santaquiteria (Universidad Politécnica de Madrid Madrid, Spain), Ariel A. Grey G. (Universidad Tecnologica de Panamá, Panamá), Yarisel González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Cenobio Cárdenas (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Nature as an Inspiration to Exploit Renewable Energy Sources: A Review on Trends and Biological Strategies 463
Orlando Aguilar Pinzón (Universidad Tecnológica de Panamá) and Miguel Chen Austin (Universidad Tecnológica de Panamá, Sistema Nacional de Investigación)

Permeable Reactive Barriers for in Situ Remediation of Nitrate-Contaminated Groundwater: A Review 469
Graciela Cecilia Sánchez Hidalgo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and María De Los Ángeles Ortega Del Rosario (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Evaluation of a Cocoa Solar Dryer Prototype in Cilico Creek, Ngäbe Bugle 477
Yoel Martin (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Félix Henríquez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Orlando Melgar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Luis Mogollón (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Biochar and Its Role to Improve Digestibility Conditions in Biogas Production 485
Joisleen Ramírez Salado (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Arthur James Rivas (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Proposal for the Use of the Multicriteria Decision Method (AHP) for the Selection of Risk Mitigation Projects 493
Diana Ng (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Luis Blanco (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Vanesa Peñalba Achurra (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Mathematical Modeling of the Aqueous Solubility of Bioactive Substances of Environmental Interest 498
Daniel Ricardo Delgado (Programa de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación de Ingenierías UCC-Neiva, Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Neiva, Colombia), Rossember Eden Cardenas-Torres (Grupo de Fisicoquímica y Análisis Matemático, Facultad de Ciencias y Humanidades, Fundación Universidad de América, Colombia), and Claudia Patricia Ortiz (Programa de Administración en Seguridad y Salud en el Trabajo, Grupo de Investigación en Seguridad y Salud en el Trabajo, Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO, Colombia)

Using DSAS Tool to Determine Shoreline Changes in San Carlos Beach, Panama 504
Víctor Gómez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Gisselle Guerra-Chanis (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Coupling Sensitivity and Correlation Analyses to Identify Important Modeling Variables in a Naturally-Ventilated Building 508
María Jaén (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Ana K. Rivera (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Miguel Chen Austin (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Effect of Thermal Hydrolysis for the Inactivation of Fecal Coliforms Present in the Sludge of the Panama Wastewater Treatment Plant 516
Adis Salias (Universidad de San Carlos, Guatemala), Marian Ramírez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Kleveer Espino (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Reuse of Effluents from the Victor Levi Sasso Campus Wastewater Treatment System, UTP for Irrigation of Green Areas 521
Geraldine Yorett (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Job Noel (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Erick Vallester (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Description of the Availability of Hydrological and Hydrogeological Information on Wells in the ZaratÍ River Sub-Basin 528
Alexandra González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Cristel Julissa Cedeño Martínez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and José R. Fábrega-Duque (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Using Concept Maps as a Tool to Understand Water Resources Management in the Rio Grande Basin 536
Alexandra González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Victor Gómez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José R Fábrega-Duque (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Gisselle Guerra-Chanis (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Carlos Saito (University of Brasilia, Brazil)

Experimental Characterization of a Solar-Photovoltaic-Powered Aquaponic System: A Case Study in Bogota, Colombia 541
Lissette Lirieth De León (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jinela González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Giacomo Barbieri (Universidad de los Andes, Colombia), Andrés González Mancera (Universidad de los Andes, Colombia), Miguel Chen Austin (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Dafni Mora (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Freddy Zapata Vanegas (Universidad de los Andes, Colombia)

Phosphorous Retention and Amorphous Iron and Aluminum Contents in Volcanic Soils from Chiriqui and Cocle, Panama 548
Manuel Morán (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Melisabel Muñoz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José Fábrega (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Jorge A. Leiva (Universidad de Costa Rica, Costa Rica)

Use of Biochar to Improve Biomethanization in Anaerobic Co-Digestion 554
Luis Mendoza (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Yeraldin González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Erick Ortiz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Marian Ramírez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Arthur James (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Long-Term Monitoring of Moisture Changes in Sedimentary Soil of the Panama Through Noninvasive Time-Lapse ERT Methodology 560
Alexis Mojica (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Anibal Fossatti (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Pablo Montero (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Leomar Acosta (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Margie Gómez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Carlos A. Ho (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Cristóbal Condori (y Geofísica de la Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa, Perú), Ramsés Buenaño (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Rosalín Méndez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Osiris Cubilla (3P Soc. Ltda., Panamá), and Eduardo Silva (3P Soc. Ltda., Panamá)

Groundwater Budget of the ZaratÍ River Sub-Catchment 567
Milagros Lorenzo (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Érica Sanchez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Melisabel Muñoz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José Fábrega (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jorge A. Leiva (Universidad de Costa Rica, Costa Rica), and María Gabriela Castrellón (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Proposal to Improve Productivity in the Energy Suspension Process in Compañía Energética, with the Dmaic Methodology 575
Ingrid Milena Fernández (Fundacion Universitaria de Popayan, Colombia), Jully Andrea Moreno (Fundacion Universitaria de Popayan, Colombia), Eymi Villarreal (Fundacion Universitaria de Popayan, Colombia), Sebastian Muñoz (Fundacion Universitaria de Popayan, Colombia), and Gustavo Paredes (Fundacion Universitaria de Popayan, Colombia)

Possibilities of the Use of Electricity for the Substitution of Liquefied Petroleum Gas (LPG) for Cooking Food in the Republic of Panama 582
Esaú Saenz (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Jessica Guevara-Cedeño (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Analyzing Feasibility of the Anaerobic Codigestion of Sewage Sludge with Organic Fraction of Municipal Solid Waste as an Energy Alternative in Panama 589
Jessica Guevara-Cedeño (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Kevin Lee (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Aldo Batista (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

A Comparative Study of Denoising Techniques for UHF Signals from Partial Discharge 595
Carlos Boya-Lara (Universidad Interamericana de Panamá, Panamá), Omar Rivera-Caballero (Universidad Interamericana de Panamá, Panamá), and Jorge Alfredo Ardila-Rey (Universidad Técnica Federico Santa Maria, Chile)

Occurrence of Organochlorine Compounds in Biosolids from Wastewater Treatment Plants in Panama City 602
Javier Lloyd (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jorge Olmos (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Ana González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Cecilio Hernández (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Euclides Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Arthur James (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Elizabeth Salazar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Kathia Broce (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Sustainability Actions Towards Neutral Carbon Footprint Higher Education Institutions: A Systematic Review 608
Vivianne Álvarez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Zuri Rodríguez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Lissette Lirieth De León (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Miguel Chen Austin (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Dafni Mora (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Relationship Between Precipitation and Variations in the Water Table During the Rainy Season in the ZaratÍ River Sub-Basin 616
Job Osvaldo Noel Amaya (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Cristel Julissa Cedeño Martinez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Kleveer Espino (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Xavier Sánchez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and José Fábrega (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Phase Change Materials in Hot Water Generation Systems: A Review 620
Diana Berrocal (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Juan Blandon (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Maria de los A. Ortega Del Rosario (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Itamar Harris (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), and Arthur James (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

Presence of Pesticides in the ChiriquÍ Viejo River, in Agricultural Areas of Cerro Punta, ChiriquÍ, Panama 627
J. Olmos (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), C. Hernández (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), J. Lloyd (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), E. Salazar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), A. González (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), K. Broce (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and D. Borrero (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Investment Opportunities That Can Be Generated by the Production and Distribution of Green Hydrogen for Panama 632
Hector Deago (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), José Santos (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Nicole Barría (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

RPAI - Robotics, Perception and Artificial Intelligence

Educational Semi-Passive Biped Walking System 640
Carlos F. Rodriguez (Universidad de los Andes, Colombia)

Long-term monitoring of moisture changes in sedimentary soil of the Panama through non-invasive time-lapse ERT methodology 647
Alexis Mojica (LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá and Sistema Nacional de Investigación, SENACYT Panamá), Anibal Fossatti (Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica CITT, Universidad Tecnológica de Panamá Panamá), Pablo Montero (Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica CITT, Universidad Tecnológica de Panamá Panama), Leomar Acosta (Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá), Margie Gómez (LABEST, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá), Carlos A. Ho (LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá), Cristóbal Condori (Departamento Académico de Geología y Geofísica de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa Perú), Ramsés Buenaño (Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá), Rosalín Méndez (LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá), Osiris Cubilla (3P Soc. Ltda. Panamá), and Eduardo Silva (3P Soc. Ltda. Panamá)

Analysis of the Potential of Remote Piloted Aircraft in the Detection of Damage by Frost in Coffee Plants 654
Diego Bedin Marin (University of Florence/UNIFI, Italy), Gabriel Araújo e Silva Ferraz (Federal University of Lavras, Brazil), Felipe Schwerz (Federal University of Lavras, Brazil), Rafael Alexandre Pena Barata (Federal University of Lavras, Brazil), Rafael de Oliveira Faria (Federal University of Lavras, Brazil), Lucas Santos Santana (Federal University of Lavras, Brazil), Valentina Becciolini (University of Florence/UNIFI, Italy), and Giuseppe Rossi (University of Florence/UNIFI, Italy)

Low Cost Mechatronic Device for Hand Grip Function Rehabilitation 659
Jervis Villalobos-Villegas (Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica), Arys Carrasquilla-Batista (Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica), Marta Vilchez-Monge (Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica), and Gabriela Ortiz-Leon (Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica)

Fruit Detection and Classification Using Computer Vision Techniques 665
Víctor Zárate (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Danilo Cáceres (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Heartbeat Classification Using Energy Percentage Distribution with Wavelet Transform and PCA 673
Carlos Boya-Lara (Universidad Interamericana de Panamá, Panamá) and Omar Rivera-Caballero (Universidad Interamericana de Panamá, Panamá)

Implementation of a Robotic Assistant to Develop and Monitor Learning Activities in Children with Autism 678
Nakediryai Martínez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Víctor López (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Jordi Albo-Canals (Fundación Hospital de San Juan de Dios de Barcelona, España), Olga Sans (Universitat Politecnica de Catalunya, España), and Lydia Toppin (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Convolutional Neural Network Model for the Detection of Diseases and Pests in Coffee Crops..... 684
Gabriel Grimaldo (Technological University of Panamá, Panamá), Humberto Rodriguez (Technological University of Panamá, Panamá), and Victor López Cabrera (Technological University of Panamá, Panamá)

Design, Modeling and Simulation of the Navigation and Control Systems for an Autonomous Sailboat Using ROS-Gazebo 691
José S. Martínez L. (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Humberto Rodríguez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Human Gait Analysis Using Inertial Sensors and Preliminary Experimental Design 699
José Mendoza (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Héctor Montes (Centro de Automática y Robótica Consejo Superior de Investigaciones Científicas en España, España), and Félix Henríquez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

MSEBSS - Materials Science and Engineering, Basic and Space Sciences

Thermal-Structural Analysis of Polymers for the Manufacture of Cases for Outdoor Pollutants Monitoring Devices 707
Sallelis Calderón (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Miriam Centella (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Luis Lozano (Tecnológico de Monterrey, México), Alan Sustaita (Tecnológico de Monterrey, México), Edwin Collado (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Yessica Sáez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Countersink Depth Control in Aeronautical Structural Components Drilling Processes by Machining Forces Analysis 715
Antonio Guerra-Sancho (Universidad Carlos III de Madrid, Spain), Juan Fernández Pérez (Universidad Carlos III de Madrid, Spain), María Henar Miguélez Garrido (Universidad Carlos III de Madrid, Spain), José Luis Cantero Guisández (Universidad Carlos III de Madrid, Spain), and José Díaz Álvarez (Universidad Carlos III de Madrid, Spain)

Mechanical Properties Enhancement for Additive Manufactured Short Fiber Composites with Salt Remelting Post-Processing 723
Dilio Alberto Long O. (Universidad Tecnológica de Panamá), Maria De Los Á. Ortega Del Rosario (Universidad Tecnológica de Panamá), and Salvatore Brischetto (Politecnico di Torino)

University Class Schedule Assignment by a Tabu Search Algorithm 728
José Javier Laguardia (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá) and Javier Antonio Flores (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Study and Description of the Soap Stone of Pajonal 733
Hillary Sandoval (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Tisla Destro (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Rita Rodríguez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Ernesto Martínez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Eric Gutiérrez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Yinela Solis (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Modelling of the Effective Permittivity of Anisotropic Filament Structures 740
Jesus Nain Camacho Hernandez (Institute for Pulsed Power and Microwave Technology (IHM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany) and Guido Link (Institute for Pulsed Power and Microwave Technology (IHM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany)

Gold Nanorods for Near-Infrared Attenuation in Sno2:F Thin Films 747
Damián Montero (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Franck Aguilar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Héctor Miranda (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), and Alfredo Campos (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

Study of Gold, Silver and Copper Thin Films for Plasmonic Sensors Applications 752
Paolo Leonelli (Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Héctor Miranda (Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), and Alfredo Campos (Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

Design and Construction of Antenna for Meteor Detection 758
Salomón Barría A. (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Joseph Frías G. (Ministerio de Educación, Panamá), Rodney Delgado S. (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Manuel Alejandro Chacón (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Optical Properties of BiFeO3: A Theoretical and Experimental Approach 764
Eleicer Ching-Prado (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Crashworthiness Behavior of Thin-Walled Bioinspired Structures in the Coconut Palm 771
Estephany Reyes (Central South University, China), Nacarí Marín (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and Kui Wang (Central South University, China)

Comparison of Surface Plasmon Excitation by Light and Electrons in Gold Nanorods 779
Franck Aguilar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama), Xiaoyan Li (Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Saclay, France), Mathieu Kociak (Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Saclay, France), and Alfredo Campos (Universidad Tecnológica de Panamá, Panama)

Study of Electrical, Optical and Structural Properties of Sno2:F Thin Films Prepared by Spray Pyrolisis 784
Ángel Crredidío (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Hector Miranda (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Amanda Watson (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Carlos Ariel Samudio (Universidad de Passo Fundo, Brasil), Joao Carlos Krause (Universidad Regional Integrada del, Alto Uruguay y las Misiones, Brasil), and Eleicer Ching-Prado (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Tidal Local Gravity Effects Measured by Remote Controlled Pendulums 790
Horacio Fernandes (Universidade de Lisboa, Portugal), Pedro A. Mendes Rossa (Universidade de Lisboa, Portugal), Manuel Santos (Universidade de Lisboa, Portugal), Rafael Henriques (Universidade de Lisboa, Portugal), Bernhard Georg Enders (Universidade de Brasilia, Brazil), Paulo Eduardo de Brito (Universidade de Brasilia, Brazil), Daniel Fernando Gomez-Barrera (Universidad de los Andes, Colombia), Carlos F. Rodríguez (Universidad de los Andes, Colombia), and Juan Gabriel Ramirez (Universidad de los Andes, Colombia)

Production of Hard Carbon from Saccharum Spontaneum, Known as "Paja Canalera" 796
Mabony Sanchez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), Orlando Auciello (University of Texas at Dallas, USA), Benjamin Stein (University of Texas at Dallas, USA), and Elida de Obaldia (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Synthesis and Characterization of Polycrystalline Bifeo3 Deposited by Sol-Gel Technique 802
Héctor Miranda (Laboratorio Pierre y marie Curie Facultad de Ciencias y Tecnologia, Universidad Tecnológica de Panama Panamá, Panamá), Elida de Obaldía (Laboratorio Pierre y marie Curie Facultad de Ciencias y Tecnologia, Universidad Tecnológica de Panama Panamá, Panamá), and Eleicer Ching-Prado (Laboratorio Pierre y marie Curie Facultad de Ciencias y Tecnologia, Universidad Tecnológica de Panama Panamá, Panamá)

Effects of Tropical Climate on Public Buildings in Panama 810
C. Hernández (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), J. Villar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), J. De La Cruz Sánchez (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), A. Avendaño (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), F. Vergara (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), E. Escobar (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá), and A. Espinosa (Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá)

Author Index **815**

Message from the General Chair

Every two years the Technological University of Panama holds the IESTEC (International Engineering, Science and Technology Engineering Congress) and in 2022 its eighth version and the second Academic Scientific Meeting - ECA, an event that for the second time brought together for one week participation from all the faculties that make up this university in a melting pot of activities, forums, workshops, clinics, academic tours, and magisterial conferences in their respective activities.

In today's world, most of the productivity of countries is derived from investment in research, development, and innovation. Innovation and scientific-technological growth are, without a doubt, one of the most transformative strategic tools that support human development and become a strategic reference framework that has led the UTP to have a more representative, influential, more transparent and open to international collaboration to provide added value to the ring: university, state, society, company.

Within this reality, the Technological University of Panama, committed to the country, through its academic, research and university extension work; in addition to the responsibility to contribute effectively, to satisfy the requirements of human resources with academic training, at a higher level, in the areas of science and technology; proposes through this international event, to promote the creation and strengthening of national and international research networks; development and innovation (R+D+i) in priority areas of the UTP and the National Strategic Plan for Science, Technology and Innovation (PENCYT); promote research by harmonizing research areas in the institution; as well as the mobility actions for our teachers and researchers with a view to the continuous improvement of human resources and the training of professionals that the Country requires for greater development and productivity, without losing the commitment of university social responsibility within the framework of the objectives of sustainable development.

It is also appropriate to indicate that this year, the event is constituted, in what is known as the perfect trinomial: IESTEC + ECA + Undergraduate Research Journey (JIC) Both national and international forming a triangle of integration at all levels of university education, where the students played different roles, from mere participants in the conferences, to exhibitors of their own projects, on this event that has positioned itself as one of the most relevant in Central America and the Caribbean.

It is indisputable that the university work of the Vice-Rector for Research, Postgraduate and Extension, as an academic-scientific instrument has allowed the contextualization of the country's problems so that they converge in a single point, the exchange of experiences derived from the investigations carried out by our researchers.

To conclude, as vice-rector for research, postgraduate and extension of the Technological University of Panama, I wish to express my congratulations to all the commissioners and representatives of the faculties, research centers and administrative units who joined in a single direction and convergence so that the IESTEC-ECA-JIC emblematic events, will reach and exceed the expectations set and that the UTP can continue to position itself in the first places both nationally and internationally, due to the quality of its processes and activities, but mainly to the collaborators of the Research Directorate, who on their giant shoulders carried the entire organization of the IESTEC-ECA-JIC.

Finally, the Technological University of Panama, with IESTEC 2022, becomes the connecting and amplifying entity of the multiple actions in the field of S&T&i and takes firm steps as the largest event of this nature in Central America and the Caribbean, and is positioned within the Republic as the public institution that directs its plans and programs towards internationalization, as a way to strengthen the country's Scientific Diplomacy and that seeks the intangible sovereignty of the Nation's scientific knowledge.

Dr. Alexis Tejedor

Message from the Scientific Committee Chair

During the International Congress of Engineering, Science and Technology (IESTEC 2022), we all obtained fruitful learning closely related to the motto of the congress, namely: “Science, Technology, Sustainability and Innovation: Pillars for Economic Recovery.” We have all learned much from the keynote sessions given by the fantastic speakers, as well as the presentations of articles and posters. All this was complemented with the forum sessions that were given interactively by specialists in the area.

The IESTEC 2022 Conference was an excellent space for the exchange of knowledge and experiences between researchers, industry representatives, end users, administrations and society in general to contribute to solving the various problems of society and especially educational ones in our own countries. The conference focused on various fields of knowledge but paid special attention to recent advances in eight thematic groups called: TG1: Materials Science and Engineering, Basic and Space Sciences, TG2: Biosciences, Biotechnology, Biomedicine and Agroindustries, TG3: Robotics, Perception and Artificial Intelligence, TG4: Energy and Environment, TG5: Education in Engineering and Social Sciences, TG6: Infrastructures, Construction and Building, TG7: Logistics, Innovation and Business Sciences, TG8: Intelligent Systems and ICT.

On behalf of the scientific committee, we would like to thank the authors for their interest in submitting articles to this conference and the chairs and co-chairs for successfully coordinating with the reviewers. Their extensive experience was applied during the review process, which was a guarantee of the quality of the conference through suggestions and comments to the authors. Also, I would like to thank all the participants who joined in person or virtually to this conference from 24 countries around the world.

Thanks to all the conference organizers for the wonderful work done to make this conference a success, especially to Dr. Alexis Tejedor, Vice Chancellor for Research, Postgraduate and Outreach, Dr. Elida de Obaldía, Dr. Zoila Castillo of the National Research Directorate and all its support team. To the chairs Dr. Nacari Marín, Dr. Alfredo Campos, Dr. Rolando Gittens, Dr. Gerardo González, Dr. Humberto Rodríguez, Dr. Jéssica Guevara, Dr. Norma Miller, Dr. Jorge Quijada Alarcón and Dr. Vladimir Villarreal, to support the Scientific Committee. For the co-chairs Dr. María Ortega, Dr. Ildeman Abrego, Dr. Rodney Delgado, Dr. Edgardo Castro, Dr. Wedleys Tejedor, Dr. Héctor Montes, Dr. Euclides Deago, Dr. Nadia de León, Dr. Casilda Saavedra, Dr. Juan M. Castillo, Dr. Ignacio Chang, Dr. Lilia Muñoz and Dr. Elia Cano for meeting the objectives of the conference.

Additionally, I would like to thank Eng. Julio García Maison, president of the IEEE chapter in Panama, who has managed the agreement between the organizers of IESTEC 2022 and IEEE Panama. Likewise, we thank Proceedings Production editors Lisa O'Conner, Tricia Yamaguchi, and Patrick Kellenberger of Conference Publishing Services (CPS). Finally, a special thanks to Ing. Kexy Rodríguez for his deep specialized technical support behind the scenes with the EasyChair platform.

Dr. Carlos A. Rovetto
President of the Scientific Committee

Committees

AUTHORITIES UTP

ING. HÉCTOR M. MONTEMAYOR Á.
RECTOR

MGTR. ALMA URRIOLA DE MUÑÓZ
VICERRECTORA ACADÉMICA

DR. ALEXIS B. TEJEDOR DE LEÓN
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN, POSTGRADO Y EXTENSIÓN

MGTR. MAURO DESTRO STIMAMIGLIO
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO

MGTR. VIVIAN VALENZUELA R.
VICERRECTORA DE VIDA ESTUDIANTIL

MGTR. RICARDO A. REYES B.
SECRETARIO GENERAL

ING. LUIS AUGUSTO MUÑOZ
COORDINADORA GENERAL DE LOS CENTROS REGIONALEs

GENERAL COORDINATING COMMITTEE
Dr. Alexis Tejedor De León
Dra. Zoila Yadira de Castillo
Dra. Elida de Obaldía
Ing. Arelis Barahona

SCIENTIFIC COMMITTEE
Dr. Carlos Rovetto
Ing. Kexy Rodríguez
Ing. Marlin Villamil

FINANCE COMMITTEE
Dra. Elida de Obaldía
Ing. Arelis Barahona

DISCLOSURE AND PROTOCOL COMMITTEE
Lic. Danilo Toro
Dr. Jayguer Vásquez
Mgtr. Martha Mosquera
Ing. Ernesto Martínez
Lic. Luz Eneida Cortés
Lic. Roberto Rivera
Eyra Cuervo
Lic. Adriana Epifanio
Lic. Yariela Guillen
Lic. Shirley Cedeño

SPONSORSHIP COMMITTEE
Dr. Juan Castillo
Dra. Zoila de Castillo
Ing. Arelis Barahona

INTERNATIONAL RELATIONS
Ing. Aris Castillo
Mgtr. Evelyn Obregón

LOGISTICS COMMITTEE
Mgtr. Karina Garcia
Ing. Marlin Villamil
Dr. Grimaldo Ureña
Lic. Yaneth Yu
Yaneth Cirea
Lic. Danilet González
Ing. Rita Rodríguez
Ing. Carlos Nieto
Ing. Gloria Valderrama
Layrin Palacios
Janelys Rodríguez
Fernando Cutire
Lic. Abdiel Ostia
Ing. Edilsa Quintero
Lic. Diana Agames
Dra. Kathia Broce
Ing. Elsa Flores
Alfredo Jiménez

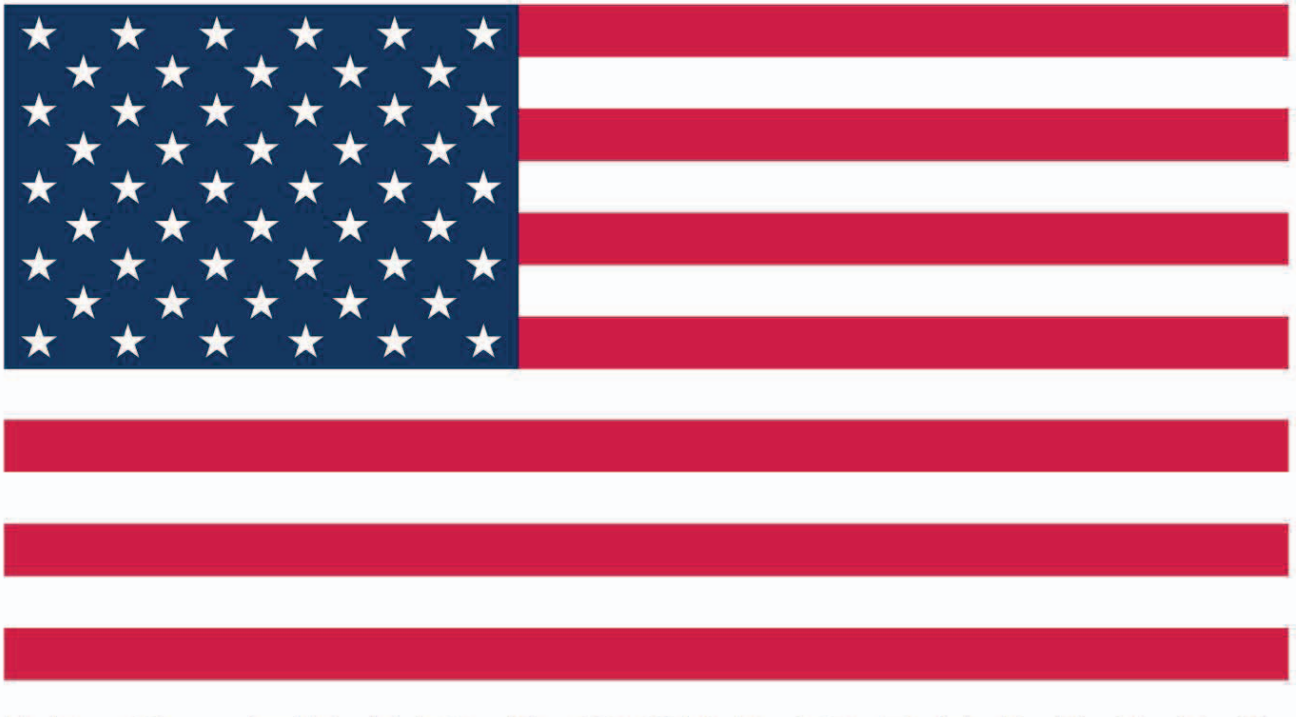
TECHNICAL SUPPORT COMMITTEE
Ing. Vanessa Caballero
Jonathan Tuñón
Hercel García
Eliécer Castillo

Reviewers

Adolfo Israel Lomeli García
Agata Garcia
Agatha DaSilva
Alberto Cañas
Alejandro Von Chong
Alexander Esquivel
Alfredo Campos
Amanda Watson
Aneth Sarmiento
Ania Cravero
Anovel Barba
Ariel Grey
Armando Castillo
Arthur James
Arturo Dominici Arosemena
Axel Villalobos
Boris Penaloza
Carlos Boya
Carlos Cabrera
Carlos Gomez
Carlos Romero Izaga
Carlos Rovetto
Carlos Samudio
Carlos Jaime Franco
Carlos Osorio Ramirez
Carmen Castaño
Cecilio Hernández
César Sáez
Clarisa Alejandrino
Cristopher Boya
Danilo Caceres
David Gutierrez Rivera
Deeyvid Saez
Dení Stincer-Gómez
Denis Cedeño
Dennis Quintero
Diego Arias
Diego Reginensi
Dorindo Cárdenas
Eddie Blanco-Davis
Edgardo Castro
Edward David Moreno
Edwin Gómez
Edwin Segura
Eibar Flores
Eleicer Ching
Eleonora Badilla-Saxe
Elia Esther Cano Acosta
Elida de Obaldia
Elizabeth Salazar
Enrique Quiroga-González
Eny Serrano
Erick Vallester
Euclides Deago
Eufemio Moreno
Evgeni Cruz
Felisa Preciado
Fernanda Alves-Rosa
Fernando Merchan
Francisco Grajales
Franklin Mendoza
Fred Wittel
Gerardo González
Gilberto Marengo
Gina Paola Maestre Gongora
Gisselle Guerra
Guillermo Jiménez
Gustavo Rojas Moya
Héctor Montes
Héctor Poveda
Humberto Alvarez
Humberto Rodríguez
Idulfo Arrocha
Ignacio Chang
Ildeman Abrego
Ilka Banfield
Indira Franco
Irlesa Indira Sanchez Medina
Irma Mercante
Iván González Díaz
Jaime Malqui Cabrera Medina
Jairo Montoya
Jaroslava Allen
Javier Lloyd
Javier Sanchez Galán
Jay Molino
Jean Carlos Saucedo
Jessica Guevara
Jessy Abrego
Jesus Alcantar
Jesus Favela
João Carlos Krause
Job Noel
John Erickson
Jorge Quijada-Alarcon
Jorge Santiago
Jose Fabrega
José Brandao
José Herrera
José Rangel
José Robles
José Alfonso Aguilar Calderon
José Luis Cantero
José Ulises Jiménez
Josefina Arellano
Joselito Medina

Juan Pablo Ojeda
Juan Gustavo Salado Castillo
Juan Manuel Montes Hincapie
Juan Marcos Castillo Guerra
Julio Castillo
Karen Elena Caballero
Katherine Acuña
Kathia Broce
Kleveer Espino
Laura Brenes
Librada Atencio
Lilia Muñoz
Luis Calvo
Luis De Gracia
Luis Garza
Macarena Espinilla
Manuel Castillero
Mara Lazzaretti Bittencourt
Marcelo Cortes-Carmona
Marcial Arias
María Ortega
María Laura González Carrera
María Lourdes Peralta
Mario Chong
Mario Velez
Mario Zapata
Martin Tanco
Mayteé Zambrano
Melisabel Muñoz
Miguel Chen Austin
Miguel Torres
Milagros Pinto-Nunez
Nacari Marín
Nadia de León
Nanette Svenson
Nathalia Tejedor
Nilda Yangüez Cervantes
Norma Miller
Norma-Lizbeth Ramírez-Cabrera
Nuvia Martez
Omar Luna
Orlando Auciello
Orlando Melgar
Oscar Garibaldi
Otaiza Cupare
Pablo Montero
Pablo Tirado
Paulo Roberto Serna Nazario
Praxedes Torres
Rafael García
Ramiro Vargas
Randy Mojica
Reinhardt Pinzon
Ricardo De León
Ricardo Santana Ojeda
Rita Arauz
Rodney Delgado
Rolando Gittens
Rooel Campos Rodríguez
Rosa De Jesus
Salvador Gallardo
Salvador Vargas
Sergio Martinez
Shiqi Fan
Sidia Moreno
Sueli Del Carmen Skinner
Vladimir Villarreal
Wilson Adarme
Ximena Cordoba
Yarelis Melgar
Yazmin Mack
Yenory Rojas
Zaili Yang
Zbigniew Omiotek
Zenaida Campbell

SENACYT
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación



U.S. EMBASSY PANAMA

IESTEC

SENACYT
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

REPÚBLICA DE PANAMÁ
GOBIERNO NACIONAL

PROPANAMA
AUTORIDAD PARA LA ATRACCIÓN DE INVERSIONES
Y LA PROMOCIÓN DE EXPORTACIONES

ITSE | EDUCACIÓN SUPERIOR DE CICLO CORTO

75 AÑOS
Conectando América

CopaAirlines

Ciudad del Saber

CENAMEP AIP

WORLD PENDULUM ALLIANCE

Naturgy

ASOCIACIÓN PANAMEÑA PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA
APANAC

FIRST QUANTUM MINERALS LTD.
Cobre Panamá

IESTEC

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ
UTP
1981

SENACYT
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

REPÚBLICA DE PANAMÁ
GOBIERNO NACIONAL

AIG
Autoridad Nacional para la
Innovación Gubernamental

IEEE
IEEE Sección Panamá

IEEE Xplore®
Digital Library

BID
Mejorando vidas

PROMED
el proceso de innovar

25 AÑOS
1997 - 2022
QLU
QUALITY
LEADERSHIP
UNIVERSITY

AUBURN
UNIVERSITY

ASEP
Autoridad Nacional de
los Servicios Públicos

JIC
JORNADA DE
INICIACIÓN
CIENTÍFICA

सत्यमेव जयते

REPVBBLICA ITALIANA
Ambasciata d'Italia
Panama

Impact of industrial maintenance on the supply chain in a textile company in times of pandemic.

Impacto del mantenimiento industrial en la cadena de suministro en una empresa textil en tiempos de pandemia.

Ing. Brenda Lorena Flores Hidalgo.
Sección de Estudios de Posgrado. UPIICSA-Instituto Politécnico Nacional.
Ciudad de México, México.
bfloresh1501@alumno.ipn.mx

Dr. Juan José Hurtado Moreno.
Sección de Estudios de Posgrado. UPIICSA-Instituto Politécnico Nacional.
Ciudad de México, México.
jhurtado@ipn.mx

M. en C. José Manuel García Córdova
Sección de Estudios de Posgrado. UPIICSA-Instituto Politécnico Nacional.
Ciudad de México, México.
jgarciaco@ipn.mx

***Abstract* — This document shows the way in which the supply chain of a company in the textile industry was affected as a result of the lack of maintenance in one of its productive processes in times of pandemic is exposed. From this premise a preventive maintenance proposal is presented, with the purpose of allowing the organization to reduce unscheduled stoppages in the machinery that produces the analyzed product. The maintenance proposal was carried out through observation, information registration and open interviews. Furthermore, the maintenance proposal was elaborated from an analysis of the critical points of the machinery, which were identified by a Pareto diagram. With this maintenance plan, it is intended to have a flexible production that allows to adapt to the needs of the current demand derived from the COVID-19 pandemic.**

Key words* — *industrial maintenance, production, supply chain, OEE, preventive maintenance.

***Resumen* — En el presente trabajo se expone la manera en que la cadena de suministro de una empresa del ramo textil se vio afectada a raíz de la falta de mantenimiento en uno de sus procesos productivos en tiempos de pandemia. A partir de esta premisa se presenta una propuesta de mantenimiento preventivo con el propósito de permitir que la organización reduzca los paros no programados en la maquinaria que elabora el producto analizado. La propuesta de mantenimiento se realizó a través de la observación, el registro de información y las entrevistas abiertas. Asimismo, la propuesta de mantenimiento fue elaborada a partir de un análisis de los puntos críticos de la maquinaria, los cuales, fueron identificados mediante de un diagrama de Pareto. Con este plan de mantenimiento se pretende tener una producción flexible que permita acoplarse a las necesidades de la demanda actual derivadas de la pandemia de COVID-19.**

Palabras clave* — *mantenimiento industrial, producción, cadena de suministro, OEE, mantenimiento preventivo.

I. Introducción.

La pandemia causada por COVID-19 ha generado daños en la cadena de suministro de todas las industrias, durante esta etapa epidemiológica se pudo notar la fragilidad y la falta de agilidad operativa de las cadenas de suministro globales, que ocasionaron fallas en las entregas de los productos básicos y escasez de los mismos, lo que ha traído consigo graves repercusiones económicas. El impacto de esta pandemia ha sido tan grave que, actualmente, algunas industrias esenciales no han tenido una recuperación completa [12].

La industria textil no ha sido la excepción, pues debido al estricto bloqueo causado por la pandemia se han generado retrasos en la cadena de suministro de fabricación, lo cual, ha hecho que la cadena de suministro de este ramo industrial se haya visto afectada notablemente [15]. De acuerdo con el informe de la Federación Internacional de Fabricantes Textiles (ITMF) los pedidos promedio y la facturación se redujeron un 42% y 32%, respectivamente [7], además, algunos ejecutivos han dicho que las ventas en esta industria podrían disminuir en más del 50% debido a las complicaciones por COVID-19 [15].

Según [3] una cadena de suministro es el conjunto de actividades relacionadas, que permiten entregar un producto final al cliente, es decir, es el estudio del flujo desde que se obtienen las materias primas hasta elaborar un producto terminado. Cabe recalcar que, la cadena de suministro funciona cuando cada una de las partes que la conforman tienen interés en alcanzar una meta en común [3].

De acuerdo con [15] la cadena de suministro, está dividida en seis partes, investigación y desarrollo, diseño, producción logística (compra y distribución), marketing y branding, y servicios. Por otro lado, [10] secciona la cadena de suministro en dos partes interna y externa, a través de esta clasificación, se representan las dos partes involucradas dentro de la cadena de suministro, como lo son el cliente y el proveedor.

Uno de los eslabones esenciales dentro de la cadena de suministro es la producción, actualmente, dada la gran fluctuación de demanda presentada a raíz de la pandemia de COVID-19, ha generado que, las empresas se vean obligadas a desarrollar un plan de producción flexible, que ayude a disminuir los riesgos de salud y demanda [15]. Por lo que, es necesario tener una eficiencia operativa que permita acelerar la capacidad de producción de una forma más precisa y espontánea [15]. Pues según [2] las organizaciones deben tener la capacidad de poder reaccionar ante posibles fluctuaciones volátiles en la demanda.

Cuando se estudia un proceso productivo, por lo general, la preocupación que se tiene va enfocada hacia las máquinas y su funcionamiento, pues, si ocurre alguna avería, es muy probable que no se obtenga la capacidad de producción deseada, lo que podría desencadenar en complicaciones en la

Sección de Estudios de Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00010

planificación de la producción, almacenamiento de inventario desmedido, aumento en los costos de producción, los cuales, inevitablemente tendrán efectos en la cadena de suministro [3].

Se ha demostrado que el costo del mantenimiento en la industria puede alcanzar desde un 15% a un 17% del costo de producción [8], por otro lado, un tercio de todos los costos de mantenimiento se desperdician como resultado de un mantenimiento innecesario o inadecuado [1], aquí radica la importancia del mantenimiento industrial en la producción, no obstante, desafortunadamente, el mantenimiento industrial en las empresas ha recibido poca atención, debido a que la mayoría de las veces se ve como un gasto y no como una inversión [5]. Cabe mencionar que, el contar con un programa de mantenimiento genera una menor tasa en las averías de la maquinaria [3] lo que permite mantener máquinas y/o equipos en un estado de funcionamiento fiable y competitivo [8].

Sin embargo, es importante señalar que, la planeación del mantenimiento debe programarse tomando en cuenta la demanda del producto pues, la producción y el mantenimiento dependen del tiempo de funcionamiento de la maquinaria [6]. Además de acuerdo con [9] priorizar las tareas de mantenimiento es esencial, pues de esta manera, se reducirán las actividades innecesarias, lo que permitirá utilizar los recursos de manera más eficiente y minimizar los costos incurridos en ellas.

En el presente artículo se presenta un análisis de la manera en que la cadena de suministro de una empresa textil se ha visto afectada a raíz de la falta de mantenimiento industrial en tiempos de pandemia, asimismo, se expone una propuesta de mantenimiento preventivo que permita garantizar que la cadena de suministro de la empresa en estudio funcione de manera ágil, segura y resiliente. Pues tal como lo menciona [15] la crisis de COVID-19 puede generar grandes cambios en la industria textil, de esta forma, debe estar preparada para afrontar de manera proactiva los nuevos desafíos y oportunidades que la pandemia demanda.

Si bien es cierto que dentro de la literatura se enlistan tres tipos de mantenimiento, la propuesta generada en este documento, aborda solo el mantenimiento preventivo, pues este tipo de mantenimiento permitirá garantizar el buen funcionamiento de la maquinaria a partir de revisiones en intervalos programados de tiempo [13].

La organización del presente trabajo está compuesta de la siguiente forma: comienza con la descripción de la metodología utilizada, posteriormente, se tienen los resultados obtenidos y finalmente se presenta la discusión de los mismos y se exponen las conclusiones del estudio.

II. Metodología

La metodología utilizada es tipo mixta, pues se hizo uso de los dos diferentes métodos de investigación, el cualitativo y el cuantitativo [11], para la recolección de evidencia documental se utilizaron diferentes técnicas, las cuales se presentan a continuación:

- Observación: Se utilizó la observación no participante, para poder reconocer las actividades que realizaban cada uno de los operadores en su estación, con el propósito de conocer el método de trabajo del proceso.
- Entrevistas abiertas: Se entrevistaron a los operadores para conocer de una manera precisa cuales son las fallas registradas que presenta la máquina principal, con el objetivo de adentrarse en el proceso y conocer la función de cada uno de los subsistemas que componen la maquinaria.

Para el registro de los paros no programados en la empresa, se le entregó un formato a uno de los operadores de la línea de producción. En la Tabla 1. Formato de registro de fallas, se puede observar que, además de catalogar las fallas, se registró el tiempo aproximado de paro y el número de pacas que se elaboraban en el día laboral, teniendo cuenta que este último, es un indicador de productividad.

TABLE I. FORMATO DE REGISTRO DE FALLAS. FUENTE: AUTORA.

Día	Horario		Fecha	Falla	Descripción	Horas de paro (aproximado)	Número de pacas que realizan
Lunes	Hora inicio						
	Hora fin						
Martes	Hora inicio						
	Hora fin						
Miércoles	Hora inicio						
	Hora fin						
Jueves	Hora inicio						
	Hora fin						
Viernes	Hora inicio						
	Hora fin						
Sábado	Hora inicio						
	Hora fin						

La recopilación y el análisis de datos expuestos en el presente artículo, se derivan de la experiencia vivencial obtenida en una empresa dedicada a la fabricación de guatas de algodón (material textil no tejido fabricado con filamento de algodón) y sintéticas (material textil no tejido fabricado con fibras cortas de poliéster), borra textil (término utilizado en el argot de la industria textil para la recuperación de desperdicio de tela, como: nylon, poliéster, algodón, etc.), laminados de borra (producto derivado de la borra con forma de lámina) y estopa (material textil hecho de fibras naturales como el lino y el cáñamo), para la industria textil. El proceso en estudio hace referencia a uno de los productos fabricados en ella, la borra textil, la Fig. 1. Etapas de la investigación, expone las cuatro etapas a partir de las cuales fue desarrollado este artículo.

A. Etapa 1. Análisis del proceso de producción, estudio de tiempos y movimientos.

El objetivo de esta etapa es comprender el método utilizado por la empresa para la manufactura de borra textil, para ello, se realizó un estudio de tiempos y movimientos, es importante mencionar que, en esta fase se elaboró un análisis de las actividades que ejecutan los operadores. La Fig. 2. Diagrama de operaciones del proceso de elaboración de borra, muestra la manera en la cual están distribuidas las operaciones, así como el tiempo medio observado (TMO) obtenido, el cual es de 2043.876 segundos, a partir de esta figura se puede notar que, este proceso requiere tres operadores principales, los cuales, se encargan de dar flujo al proceso productivo.

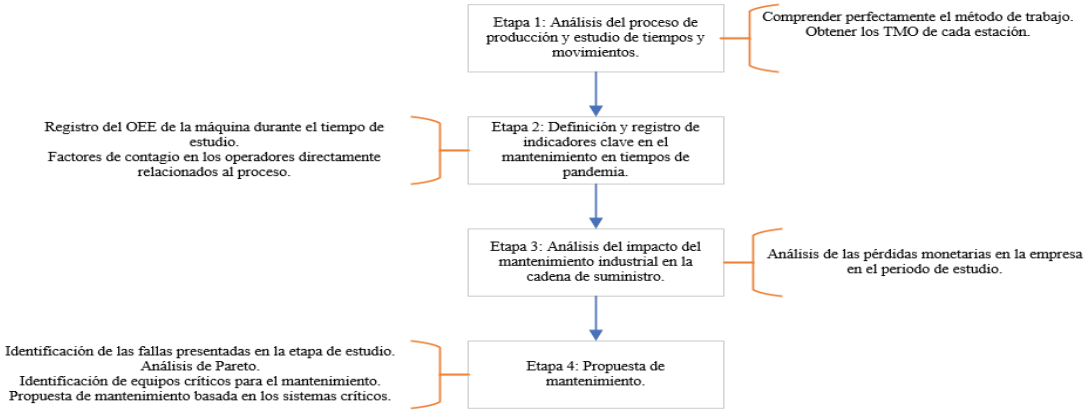


Fig. 1. Etapas de la investigación. Fuente: Autora.

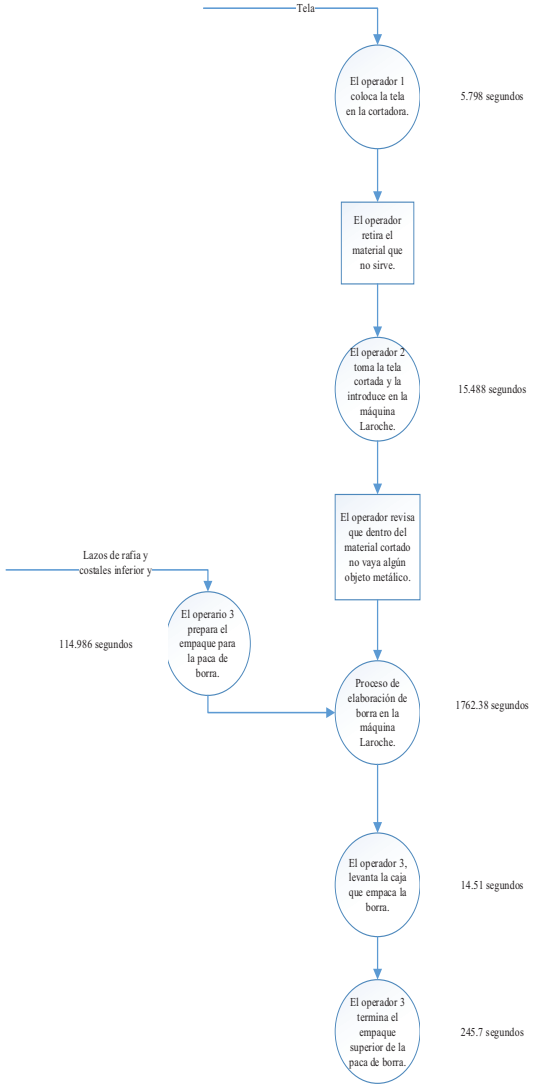


Fig. 2. Diagrama de operaciones. Fuente: Autora con datos de la empresa.

Asimismo, en esta etapa se enlistan los aspectos a través de los cuales se presentaron los contagios por covid-19 en la empresa de estudio, los cuales, fueron corroborados en entrevistas con trabajadores y directivos.

B. Análisis del impacto del mantenimiento industrial en la cadena de suministro.

En esta etapa se analizó el impacto que tiene el mantenimiento industrial en uno de los eslabones de la cadena de suministro como lo es la producción. De igual forma, se realizó un análisis del modo en que el mantenimiento ha afectado a la empresa de forma externa a partir de pérdidas de cliente, baja en los pedidos de borra y aumento de inventarios

C. Propuesta de mantenimiento.

La etapa final de este artículo muestra una propuesta de un plan de mantenimiento basada a través de los puntos críticos identificados en la fase de diagnóstico de los sistemas que conforman el proceso de producción, a partir de dicha técnica, se plantean las actividades preventivas para advertir las fallas generadas por el no mantenimiento y de esta manera garantizar que la cadena de suministro de la empresa en estudio funcione de manera ágil, segura y resiliente.

III. RESULTADOS.

A. Monitoreo del OEE.

La Tabla 2. Especificaciones actuales de la empresa, se presentan las características laborales del proceso productivo, en ella, se muestra el horario laboral que cumplen los operadores, así como el tiempo de los paros programados en la jornada.

TABLE II. ESPECIFICACIONES ACTUALES DE LA EMPRESA. FUENTE: AUTORA CON DATOS DE LA EMPRESA.

Jornada laboral	Lunes a sábado	Inicio	Fin	Tiempo (min)
Horario	Lunes a viernes	7:00	16:00	540
	Sábado	7:00	13:00	360
Paros programados	Preparación de la máquina	7:00	7:30	30
	Hora de comida	12:30	13:00	30
	Limpieza de la máquina	15:40	16:00	20
Consideraciones extra	El día sábado no hay tiempo para la comida			

A partir del TMO y de la información expuesta anteriormente, se calculó la capacidad de producción, el porcentaje de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los días laborales, utilizando las (1), (2), (3) y (4). Es importante recalcar que las últimas 3 ecuaciones fueron utilizadas para conocer el monitoreo del OEE general, véase (5).

$$CP = \frac{Tiempo\ operativo}{TMO} \quad (1)$$

$$\%\ disponibilidad = \frac{Tiempo\ operativo - tiempo\ de\ paros\ no\ programados}{Tiempo\ disponible} \quad (2)$$

$$\%\ rendimiento = \frac{Producción\ real}{Producción\ teórica} \quad (3)$$

$$\%\ calidad = \frac{Producción\ real - productos\ malos}{Produccion\ real} \quad (4)$$

$$OEE = Disponibilidad * Rendimiento * Calidad \quad (5)$$

La Fig. 3. Comportamiento del OEE, presenta la secuencia del OEE del periodo comprendido entre el martes 4 de enero del 2022 hasta el miércoles 26 de enero del 2022, el cual, fue calculado a través de (5). Cabe mencionar que, se instauraron cuatro niveles de referencia, los cuales se obtuvieron con el propósito de conocer cómo el mantenimiento industrial y los contagios por Covid-19 repercutieron en la eficiencia general del equipo, siendo un nivel inaceptable del 0 al 64%, regular del 65% al 84%, estándar de clase mundial del 85% al 99% y perfecto cuando se tiene un porcentaje del 100% [4] [12].

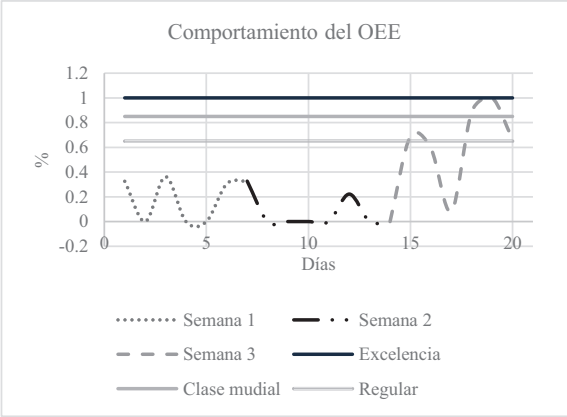


Fig. 3. Comportamiento del OEE. Fuente: Autora con datos de la empresa.

A partir de la Fig. 3, se puede observar que la semana previa del contagio (línea con punto redondo) se tuvo un OEE, inaceptable, esto debido principalmente a los paros no programados generados por las averías en la maquina principal. Sin embargo, la semana posterior (línea guión y dos puntos) se muestra un OEE inferior al de la semana 1, descendiendo varios días a un nivel de 0%, dicho comportamiento se debe especialmente a los contagios generados por el Covid-19.

En última instancia, en la semana 3 (línea con guiones), se observa un incremento del OEE, provocado por la reincorporación del personal en el proceso productivo, si bien es cierto que, en esta semana se nota un incremento en el OEE, se siguen teniendo fluctuaciones en el mismo, causados por los paros no programados provocados por las averías en la máquina principal.

Como se ha mencionado anteriormente, en la segunda semana de estudio se presentó el contagio de SARS-CoV-2 en los trabajadores de esta línea de producción, la Tabla 3. Características del contagio, resume algunos aspectos relevantes a considerar. Cabe señalar que, además de incluir a los operadores inmersos directamente en el proceso de fabricación, se añadieron a los operadores encargados de darle mantenimiento a todas las máquinas de la empresa. Tal como se puede observar, todos los operadores involucrados en el proceso están vacunados, no obstante, la forma de contagio se presentó a través de la convivencia diaria con otros operadores.

TABLE III. CARACTERÍSTICAS DEL CONTAGIO. FUENTE: AUTORA CON DATOS DE LA EMPRESA.

Operador	Función	¿Está vacunado contra COVID-19?	Forma de contagio
1	Alimentar cortadora	Sí	A partir del contacto con otros operadores
2	Alimentar máquina Laroche	Sí	A partir del contacto con otros operadores
3	Empaquetar borra	Sí	A partir del contacto con otros operadores
4	Jefe de mantenimiento	Sí	A partir del contacto con otros operadores
5	Mecánico de mantenimiento	Sí	A partir del contacto con otros operadores
6	Mecánico de mantenimiento	Sí	A partir del contacto con otros operadores

B. Producción y cadena de suministro.

Con el propósito de conocer la manera en que el mantenimiento industrial generó repercusiones en la productividad de la empresa, se dio seguimiento a la cuota semanal establecida por la organización, la cual es de 9 toneladas. La Fig. 4. Producción semanal, presenta el monitoreo de la productividad en las semanas de estudio. A través de la presente gráfica se refuerza el comportamiento presentado en la Fig. 3, pues tanto semana 1 como la 2, no cumplen con su cuota semanal, mientras que la semana 3, si lo cumple.

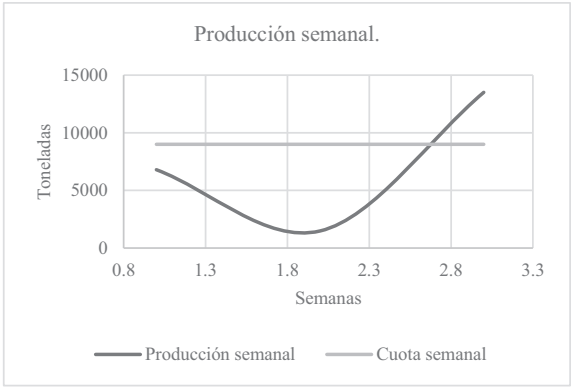


Fig. 4. Producción semanal. Fuente: Autora con datos de la empresa.

Asimismo, la Tabla 4. Análisis de productividad, muestra de manera porcentual el comportamiento de la producción en las semanas de estudio, tal como se observa las semanas 1 y 2, están por debajo de la cuota semanal en un 24% y 84%, respectivamente, mientras que la semana 3, se encuentra por encima de lo establecido en un 50%, aunado a esto, se puede observar que en la semana de contagio (semana 2) se redujo la producción de borra en un 78%, esto debido a la ausencia tanto de los operadores como de los encargados del mantenimiento, no obstante, la semana posterior, cuando se reincorporaron los trabajadores, la productividad aumentó en un 89%, lo que demuestra que el factor humano dentro del proceso productivo es fundamental.

TABLE IV. ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD. FUENTE: AUTORA CON DATOS DE LA EMPRESA.

Semanas	Total de kg	Cuota semanal	Diferencia respecto a la cuota semanal	Diferencia respecto a la semana anterior.
1	6797	9000	-24%	
2	1483.8		-84%	-78%
3	13507.8		50%	89%

En este mismo orden de ideas, se calculó de manera monetaria cuando perdió la empresa por la falta de mantenimiento en la maquinaria principal, teniendo consecuencias por el incumplimiento de los pedidos solicitados por algunos de sus clientes. La Tabla 5. Análisis monetario, presenta la información pertinente a las 3 semanas en estudio.

TABLE V. ANÁLISIS MONETARIO. FUENTE: AUTORA CON INFORMACIÓN DE LA EMPRESA.

Información.	Semana 1	Semana 2	Semana 3
Producción semanal (No. de pacas)	28	6	57
Pacas requeridas	30	20	60
Diferencia	-2	-14	-3
Peso promedio de las pacas	239.2		
Total de kg por pacas solicitadas	7175.03	4783.35484	14350.065
Costo por kg	$ 8.00		
Costo total	57400.26	38266.8387	114800.52
Pérdida monetaria	3826.68	26786.7871	5740.0258
% de pérdida	7%	70%	5%

Como se observa en las semanas de estudio en ninguna se cumplieron con los pedidos solicitados, teniendo una pérdida del 7%, 70% y 50% respecto al costo total por semana, lo que implica un 17% del total de las tres semanas en seguimiento.

Asimismo, de acuerdo con entrevistas realizadas al área de producción, después de estas semanas los pedidos de borra disminuyeron, incluso dejaron de abastecer a uno de sus clientes, lo cual, desencadenó en que actualmente tengan un exceso de inventarios de pacas de borra, pues de acuerdo con la entrevista realizada al gerente de operaciones, el almacenaje de este producto pasó de 20 pacas a 130 pacas de borra, lo cual, significa un exceso de producción del mismo.

La Fig. 5. Diagrama de la cadena de suministro, muestra esquemáticamente la cadena de abastecimiento de la empresa en estudio, cabe recalcar que, se ha incluido el área de mantenimiento pues tal como se ha abordado el mantenimiento dentro de cualquier industria impacta directamente en la producción de la misma.

En ella se puede observar que uno de los suministros principales son la tela utilizada para la elaboración del producto, aunado a esto se expone que el personal operativo es un insumo esencial dentro del proceso de producción y de mantenimiento, ya que, al verse afectado por problemas tales como el COVID-19, repercute de manera significativa en los demás eslabones de la cadena de suministro de la empresa en estudio. Particularmente en este caso, la falta de operadores provocó que la línea de producción estuviera inhábil en los días de incapacidad de los mismos, lo que generó que se incumplieran los pedidos solicitados por el cliente, lo que a su vez ocasionó que el área de ventas se viera afectada al reducir su cartera de clientes.

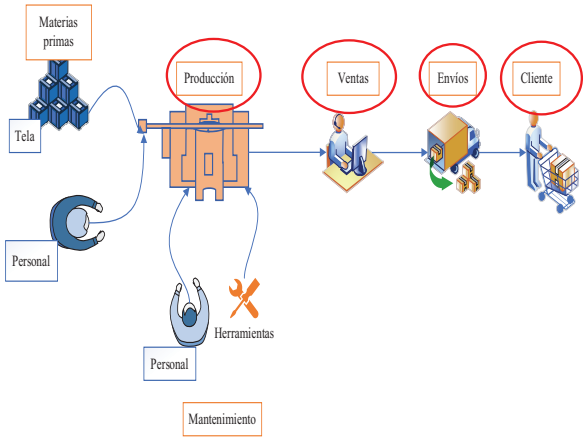


Fig. 5. Diagrama de la cadena de suministro. Fuente: Autora.

Los círculos que se observan en la Fig. 5, muestran aquellas partes de la cadena de suministro de la empresa textil que se vieron afectadas por la falta de mantenimiento y por la ausencia de los operadores, tal como se expone, se vieron alterados tres elementos más de la cadena a parte del área de produccion. De esta manera, se reafirma que la interrupciónn en alguna de las áreas permea en las demás.

C. Propuesta de mantenimiento.

Con base en los registros de la bitácora de fallas obtenidos a lo largo de este periodo de estudio, se elaboró la Fig. 6. Paros no programados, a través de ella se puede notar que más del 50% de los paros generados fue por el factor personal, es decir, por la falta de operadores tanto de producción como de mantenimiento que están involucrados en la fabricación de borra. Por otro lado, en la gráfica también se puede observar que los equipos como el interruptor del sistema eléctrico, la cortadora y la prensa han generado el 17%, 15% y 9% del tiempo por paros no programados, respectivamente.

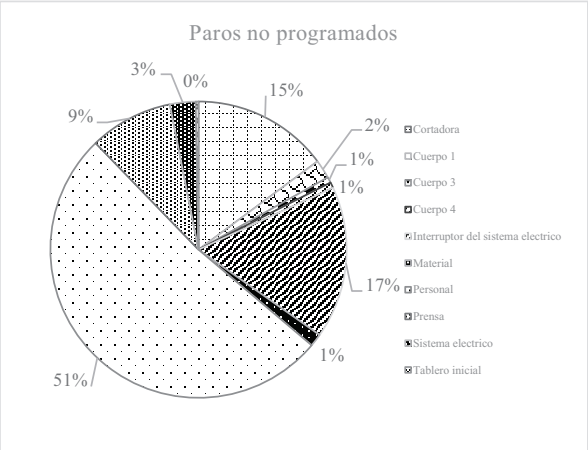


Fig. 6. Paros no programados. Fuente: Autora.

En este mismo orden de ideas, con el objetivo de identificar los puntos críticos del proceso que requieren mantenimiento, se elaboró la Fig. 7. Diagrama de Pareto, es importante mencionar que, el análisis de Pareto también se le conoce como una técnica 80/20, la cual, se basa en la afirmación de que el 80% de los principales errores son causados por el 20% de los factores vitales, pues es esencial distinguir los 'pocos vitales' de los 'muchos triviales' [8]. En este gráfico se observa que, los sistemas críticos son el interruptor del sistema eléctrico, la cortadora y la prensa, por lo que se implica que la propuesta de mantenimiento irá enfocada a la prevención de averías que suceden en estos equipos.

La Tabla 6. Propuesta de mantenimiento preventivo, muestra que existen varias fallas que tienen los tres subsistemas identificados, algunas de ellas, incluso requieren el cambio de algunos componentes, no obstante, a partir de estas acciones se pretenden prevenir las averías generadas en el periodo de estudio, pues como lo menciona [13] garantizar equipos y materiales críticos a través de una producción más ágil y una logística de entrega rápida equivale a salvar más vidas o ralentizar la propagación de casos positivos de COVID-19, además de generar resiliencia en el proceso productivo.

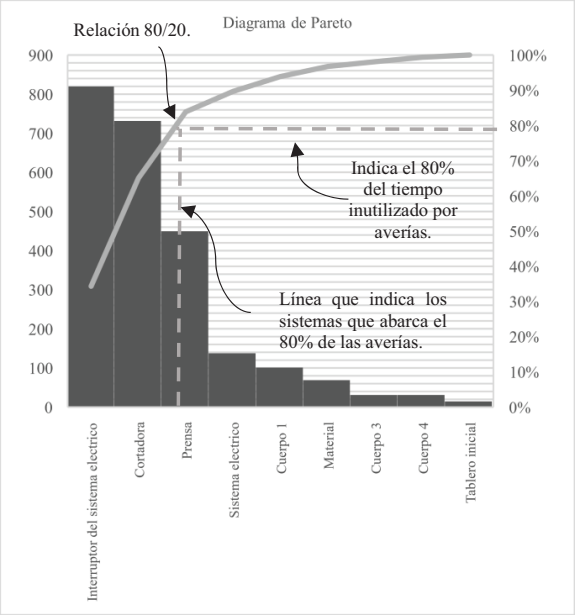


Fig. 7. Diagrama de Pareto. Fuente: Autora.

La propuesta de mantenimiento, se basa en la combinación de dos metodologías, tales como el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y el mantenimiento productivo total (TPM), la primera de ellas se utilizó con el propósito de preservar las funciones de la maquinaria, es decir, prevenir las fallas tanto mecánicas, desgastes, fracturas, etc., que se pudieran presentar en los sistemas identificados como críticos, esta valoración, se realizó a través del análisis de criticidad de los equipos de acuerdo con lo que se indica en la norma SAE JA1012, la cual, categoriza el nivel de riesgo que representa cada componente.

Por otro lado, el TPM se empleó para generar un mantenimiento proactivo por parte de los operadores, con el objetivo de que cada uno de los mismos estén capacitados para realizar el mantenimiento requerido y de esta manera, dar solución al problema por falta de personal agudizado por el SARS-CoV-2 expuesto a lo largo del artículo, las actividades de mantenimiento se propusieron a partir de los datos recabados del mantenimiento correctivo obtenido a través del monitoreo del OEE en la fase de estudio, lo que permitió generar un mantenimiento de tipo preventivo.

TABLE VI. PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO. FUENTE: AUTORA.

Subsistema	Fallas comunes	Acción	Frecuencia	Encargado	Observaciones
Interruptor del sistema eléctrico	Se va la luz en la planta	Mantenimiento	Mensual	Mecánico de mantenimiento	Requiere registro
		Apriete de conexiones	Mensual	Mecánico de mantenimiento	Requiere registro
Cuchilla	Se afilan las cuchillas	Afilar las cuchillas	Cada 3 días	Mecánico de mantenimiento	Requiere registro
	Sólo tienen una cuchilla y si falla dejan de producir	Comprar otra cuchilla	N/A	Gerente de producción	Requiere registro
	Se traba el material en el rodillo	Realizar limpieza cada 3 horas (sopletear)	Cada 3 horas	Operador 1	Requiere registro
		Revisar el tipo de material a cortar (si es licra quitarlo)	Diariamente	Operador 1	Requiere registro

		O cortar 2 o 3 veces el material	Diariamente	Operador 1	Requiere registro
	El material no se adhiere al tendido	Comprar un tendido nuevo	N/A	Gerente de producción	Requiere registro
		Ajustar la velocidad del tendido	Semanal	Mecánico de mantenimiento	Requiere registro
	Se presenta una fuga de aceite en el motor reductor	Revisar nivel de aceite	Cada medio año	Mecánico de mantenimiento	Requiere registro
		En caso de fuga revisión	Inmediata	Mecánico de mantenimiento	Requiere registro
Prensa	Fuga de aceite en las mangueras	Cambio de empaque	Cada año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Revisión de los empaques	Cada medio año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
	La bobina se calienta	Colocar un ventilador que enfríe la bobina	N/A	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Cambio de la bobina por otra de mayor tamaño	N/A	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
	El pistón se queda trabado	Cambio de empaque	Cada año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Revisión de los empaques	Cada medio año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
	Pastilla	Cambio de pastilla	N/A	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Mantenimiento de la pastilla	Semanal y mensual	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
	Tablero de la prensa	Apriete de conexiones	Semanal y mensual	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Lavado de tableros	Semanal y mensual	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
	Empacadora	Cambio de empaque	Cada año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Revisión de los empaques	Cada medio año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
	Caja	Cambio de empaque	Cada año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro
		Revisión de los empaques	Cada medio año	Jefe de mantenimiento	Requiere registro

IV. Discusión y conclusiones.

A través del presente documento se reafirmó la importancia del mantenimiento industrial, particularmente del mantenimiento preventivo, dentro de uno de los eslabones esenciales de la cadena de suministro, la producción, tal como se pudo comprender a lo largo de este artículo, la falta de un mantenimiento oportuno generó que la producción disminuyera en un 24% y un 89% en las semanas de estudio respecto a la cuota semanal de 9 toneladas establecida por la empresa, de esta manera, se ratifica que el mantenimiento industrial juega un papel crucial en la eficiencia operativa de un proceso productivo.

Asimismo, se pudo notar que el no contar con un plan de mantenimiento en tiempos de pandemia ha tenido consecuencias graves para la empresa en estudio, pues no solo el factor humano ha jugado un papel importante, sino que, el incumplimiento de los pedidos de borra ha ocasionado que los clientes que se tenían hayan cambiado de proveedor, lo que no solo ha dejado pérdidas monetarias, sino que, ha provocado un exceso de inventario pasando de 20 a 130 pacas de borra almacenadas.

Si bien es cierto que, la pandemia de COVID-19 ha generado grandes cambios alrededor del mundo, una manera de afrontar esta etapa de crisis es estar preparados bajo una planeación estratégica para los nuevos desafíos y oportunidades que se presenten, pues como se ha visto, las empresas deben estar preparadas para reaccionar ante las fluctuaciones de la demanda que pudieran existir.

La contribución de este artículo es la adaptación de diversas metodologías del mantenimiento como el RCM y el TPM, para la elaboración de un plan de mantenimiento que permita acoplarse a las necesidades específicas de la empresa en estudio.

La relevancia del presente documento resulta interesante, pues a través de este artículo se refleja numéricamente los efectos negativos de la falta de mantenimiento preventivo en tiempos de pandemia, ya que, como se pudo comprobar, la empresa en estudio perdió alrededor de un 17% de las ganancias esperadas en las semanas de análisis. En última instancia, cabe señalar, que este trabajo tiene la finalidad de que cualquier organización de este ramo pueda utilizar esta investigación como base para generar un plan de mantenimiento preventivo que le permita afrontar las dificultades actuales y futuras.

Reconocimiento.

La autora agradece al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA) por su apoyo incondicional para el desarrollo de este artículo de investigación, asimismo, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada No. 803111, también reconoce el apoyo de la beca BEIFI, la cual, es parte del proyecto de investigación bajo el programa No. SIP20220281.

Referencias.

[1] Achamu, G., Melese, A., Haile, B., & Sundaram, B. (2018). TPM and RCM Implementation in Textile Company for Improvement of Overall Equipment Effectiveness. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 4(10), 129–136. https://doi.org/10.31695/ijasre.2018.32914

[2] Bruce, M., Daly, L., & Towers, N. (2004). Lean or agile: A solution for supply chain management in the textiles and clothing industry? International Journal of Operations & Production Management, 24(2), 151–170. https://doi.org/10.1108/01443570410514867

[3] Chong, M. Y., Chin, J. F., & Hamzah, H. S. (2012). Transfer of total productive maintenance practice to supply chain. Total Quality Management & Business Excellence, 23(3–4), 467–488. https://doi.org/10.1080/14783363.2011.637788.

[4] Cruelles, J. A. (2010). La Teoría de la Medición del Despilfarro (2.a ed.). Artef.

[5] Dowlatshahi, S. (2008). The role of industrial maintenance in the maquiladora industry: An empirical analysis. International Journal of Production Economics, 114(1), 298–307. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.02.009

[6] Huang, J., & Wang, L. (2018). Makespan minimization on single batch-processing machine considering preventive maintenance. 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 294–298. https://doi.org/10.1109/iea.2018.8387113

[7] International Textile Manufacturers Federation. (2020). 4th ITMF-Survey about the impact of the corona-pandemic on the global textile industry. https://www.itmf.org/images/dl/press-releases/2020/Corona-Survey-4th-2020.06.18-Press-Release.pdf

[8] Karuppiah, K., Sankaranarayanan, B., & Ali, S. M. (2021). On sustainable predictive maintenance: Exploration of key barriers using an integrated approach. Sustainable Production and Consumption, 27, 1537–1553. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.023

[9] Lopes, I. S., Senra, P., Neto, B., Costa, R., Sousa, M., Cabo, T., & Oliveira, J. A. (2017). Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling. 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2102–2016. https://doi.org/10.1109/ieem.2017.8290263

[10] Martin, H., Syntetos, A. A., Parodi, A., Polychronakis, Y. E., & Pintelon, L. (2010). Integrating the spare parts supply chain: an inter‐disciplinary account. Journal of Manufacturing Technology Management, 21(2), 226 - 245. https://doi.org/10.1108/17410381011014387

[11] Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill Education.

[12] Sarkis, J. (2020). Supply chain sustainability: learning from the COVID-19 pandemic. International Journal of Operations & Production Management, 41(1), 63–73. https://doi.org/10.1108/ijopm-08-2020-0568

[13] Suryaprakash, M., Gomathi Prabha, M., Yuvaraja, M., & Rishi Revanth, R. (2021). Improvement of overall equipment effectiveness of machining centre using tpm. Materials Today: Proceedings, 46, 9348–9353. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.820

[14] Thorat, R., & Mahesha, G. (2020). Improvement in productivity through TPM Implementation. Materials Today: Proceedings, 24, 1508–1517. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.470

[15] Zhao, L., & Kim, K. (2021). Responding to the COVID-19 Pandemic: Practices and Strategies of the Global Clothing and Textile Value Chain. Clothing and Textiles Research Journal, 39(2), 157–172. https://doi.org/10.1177/0887302x21994207

Monorails, unconventional railway technologies: a review
Monorrieles, tecnologías ferroviarias no convencionales: una revisión

Aranzazu Berbey-Alvarez
Universidad Tecnologica de Panamá
Panamá, Rep. de Panamá
aranzazu.berbey@utp.ac.pa
0000-0003-4278-5478

Rony Caballero
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Rep. de Panamá
rony.caballero@utp.ac.pa
0000-0002-0516-4915

Felix Henriquez- Espinosa
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Rep. de Panamá
felix.henriquez@utp.ac.pa
0000-0002-9009-2599

***Abstract*— This article presents a review of unconventional mass rail transportation systems called monorails. This review includes the description of the main characteristics of the monorails, the technical diagrams, the advantages and disadvantages, a general list of the main operating monorails in the world with their general characteristics, the main reasons for choosing this type of mass transportation technology of passengers above conventional rail technologies, a historical record of monorail accidents that have occurred. In addition, it presents a characterization of the conceptual engineering and the current state of progress of the Panama City Monorail Line Project. Finally, the conclusions and future lines of research are presented**

Keywords*— monorails, line 3, Panama Metro, railway engineering

***Resumen* — El objetivo de este artículo es presentar una revisión sobre los sistemas de transporte ferroviarios masivos no convencionales llamados monorrieles. Esta revisión incluye la descripción de las principales características de los monorrieles, los esquemas técnicos, las ventajas y desventajas, un listado general de los principales monorrieles operativos en el mundo con sus características generales, las principales razones para elegir este tipo de tecnología de transporte masivo de pasajeros por encima de las tecnologías ferroviarias convencionales, un registro histórico de los accidentes de monorrieles ocurridos. Además, presenta una caracterización de la ingeniería conceptual y el estado actual de avance del Proyecto de línea de monorriel de la ciudad de Panamá. Finalmente se presentan las conclusiones y líneas futuras de investigación.**

Palabras claves — monorrieles, línea 3, Metro de Panamá, ingeniería ferroviaria

I. INTRODUCCION

En general, el monorriel es un modo de transporte ferroviario no convencional [1] para pasajeros que se distingue, de los otros modos de transporte ferroviarios convencionales, por el uso de un carril o riel único [2], ya sea apoyado sobre estructura de pilotes o con el material móvil en suspensión. Existen países como el Reino Unido, que ha establecido una definición de carácter legislativa [3] del término monorriel- en inglés monorraíl- siendo esta: "*una modalidad en la que los vehículos están soportados y guiados en su totalidad o principalmente por medio de un único carril o viga"*.

El material móvil, ya sea que circule de forma suspendida o apoyada sobre una monoviga, es más ancho [4] que el elemento que soporta la conducción guiada de este tipo de vehículo ferroviario. La velocidad promedio es de 60 km/h[5]. Los monorrieles son sistemas de transporte terrestre de pasajeros impulsados por motores eléctricos rotativos. Su gran fortaleza, es la capacidad de adaptarse mejor que las tecnologías ferroviarias convencionales a los tramos con curvas fuertemente pronunciadas[6], con pendientes del 10% [2] y con radios de giro más pequeños [6]. Por ejemplo, las pendientes máximas de las líneas monorrieles, como la línea 3 de Chongqing y la línea de Okinawa son de 6% ó 60mm/m[7].

Otro ejemplo, es el monorraíl de Shenzhen (China) con una flota rodante de cinco trenes de clase P28 / 24, de tres coches, cada uno con una capacidad de 24 pasajeros[8]. La longitud de la línea es de 4.5 km y su ancho de vía es de 500 mm. La línea cuenta con una pendiente máxima de 15%[9]. La viga de monorraíl es de 500mm de ancho y 700mm de altura, y tiene una columna de apoyo cada 15 metros[8]. Esta línea ferroviaria, llamada *"La Happy Line"* es una línea de monorraíl en el centro de Shenzhen. La línea es un *"loop"* o circular[10] y tiene siete estaciones, incluyendo las paradas en la China espléndida, el valle feliz, la ventana del mundo, y la aldea de la cultura popular de China[8]. La velocidad del viaje es de 20km/h y realiza el viaje completo en 25 minutos. Su velocidad máxima es 40 km/h.

De acuerdo con autores como Vuchic [11] el intervalo de circulación de los monorrieles corresponde a 2 minutos y tienen la capacidad de transportar 20,000 pasajeros/hora/dirección. Otros autores como Voice [12] elaboran una definición más crítica del término monorriel, la cual (traducida del inglés) corresponden a:

"*El monorriel significa un modo en el que los vehículos están soportados total o principalmente por medio de un solo carril o viga y guiados, ya sea por el riel, viga o por los carriles auxiliares o la viga*". Los vehículos están:

- Apoyados en un solo carril[13]; o
- Suspendido o colgando de un carril, de viga o viga dividida o de un carril-guía; o
- Straddle sobre riel, viga o sistema de guiado,
- Dependen de una fuente de energía para el conjunto de su funcionamiento.

Este artículo es presentar una revisión general sobre los monorrieles. Se incluye la descripción de las principales características, los esquemas técnicos, las ventajas y desventajas, un listado de los monorrieles operativos actuales entre otros aspectos interesante de esta temática. Finalmente se presenta una caracterización de la ingeniería conceptual y el estado actual de avance del Proyecto de línea de monorriel de la ciudad de Panamá que conecta la Ciudad de Panamá con el área oeste de la provincia de Panamá.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00011

II. Esquema Tecnico

Los monorrieles se clasifican de acuerdo con la relación que tienen con el elemento de guía o monoviga a través del cual discurre el material rodante. En este sentido, tenemos: monorriel apoyado [1], monorriel suspendido [1] y un tercer tipo denominado experimental [14]. De acuerdo Lee *et al.,*[15] un coche (vagón) de un monorraíl tiene dos bogíes que están compuestos cada uno de neumáticos para la circulación, la guía y para estabilizar las ruedas (Ver figura 1).

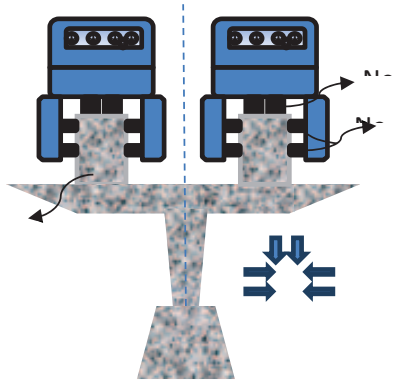


Figura 1. Esquema conceptual del sistema monorriel apoyado. Tópicos de actualización tecnológica. A. Berbey-Álvarez.

Los monorrieles están compuestos por los siguiente subsistemas: cuerpo, bogie, sistema de tracción, sistema de frenado, sistema de potencia auxiliar y sistema de aire acondicionado[13]. ALWEG desarrolló el monorraíl de tipo apoyado, que utiliza una viga de hormigón como superficie de rodadura. Aunque este método deja los vehículos expuestos a los elementos de la naturaleza, pueden subir pendientes pronunciadas de hasta un 6%[16], [17] y tener una operación suave y silenciosa (Ver figura 1).

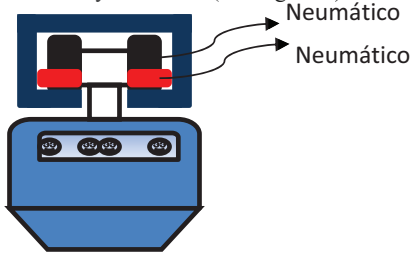


Figura 2. Esquema conceptual del sistema monorriel suspendido. Tópicos de actualización tecnológica. A. Berbey-Álvarez

De acuerdo a Monorail Society [4] y Crăciun *et al.,* [17], Kikuchi y Onaka[18] otro tipo de sistema de transporte ferroviario tipo monorraíl se desarrolló en Francia a principios de los años sesenta. Se conoció como SAFEGE[1]. En este diseño la superficie de rodadura consiste en una viga de hormigón que sirve de caja, con una abertura en la parte inferior. En su interior, se insertan los bogíes equipados con ruedas de goma, y el marco del vehículo cuelga debajo de ellos, unidos a los bogíes con vigas de acero (Ver figura 2). Esto hace que el modelo SAFEGE tenga la sección de bogíes y el plano de la rodadura fuera de la intemperie, en comparación con el modelo ALWEG por lo que es ideal para ciudades donde es común las nevadas fuertes, las lluvias o bajas temperaturas. Aunque son menos populares que los modelos ALWEG, los vehículos monorrieles tipo SAFEGE [17] se encuentran en Alemania y Japón. También existen aplicaciones de monorrieles en el transporte de personal, materiales, equipos y minerales para la actividad minera[19]. De acuerdo a Kuwabara *et al.,* [20] en cuanto a la configuración del sistema monorriel se tiene dos tipo uno a escala pequeña y otra a escala grande. Kuwabara *et al.,* [20] indica que los vehículos monorraíl con neumáticos de goma pueden manejar pendientes pronunciadas (6%) y curvas de radio pequeño (40 metros) para el caso del monorriel pequeño.

Tabla 1 Características técnicas del monorriel.

Parámetro	Monorriel convencional	Monorriel pequeño
Peso bogies	10-11 toneladas	8 toneladas (average)
Configuración del tren	4 coches	4 coches
Capacidad nominal	415 pasajeros/tren	194 pasajeros/tren
Capacidad planificada	Sentados: 177	Sentados: 88
Capacidad máxima	De pie: 238	De pie: 106
Pesos pasajeros	692 pasajeros/tren	315 pasajeros/tren
Configuración-distribución pasajeros	966 pasajeros/tren	406 pasajeros/tren
Ejemplos[21]	Chongqing Rail Transit, Kitakyushu Monorail, Osaka Monorail, Tama Toshi Monorail Line	Sentosa Express (Singapore)

Fuente: Elaboración a partir de Kuwabara *et al.,* [20] y [21]

III. Ventajas y desventajas de los sistemas de transporte tipo monorrieles

A. Ventajas

Existen varios autores como Zamorano *et al.*,[2], Vuchic[11], Pyrgidis[14] y The monorail society [4], JICA[22], Berbey-Alvarez *et al.,*[23], Miller et al., [24] que han esbozado una serie de razones para el uso de esta tecnología de sistemas de transporte ferroviario. Esta tecnología tiene las siguientes ventajas:

1. El sistema monorriel ocupa un espacio reducido de la superficie[5], ya que la monoviga va sobre pilastras, lo cual es bueno para efectos de reducir las expropiaciones de terrenos de superficie[14]. De esta manera, al igual que los tramos elevados de las líneas 1 y 2 del metro de Panamá, no interfiere mínimamente con la infraestructura de la carretera. Esta situación se evidencia en monorrieles que dan servicios de transporte de pasajeros en zoológicos, parques temáticos, centros de diversiones, centros comerciales.

2. Al igual que las tecnologías convencionales de transporte ferroviario, el monorriel no produce contaminación atmosférica y circula casi silenciosamente[25], es decir, son vehículos no-contaminantes, amigables con el ambiente[5], reservados, seguros, controlados

automáticamente[26]. Todas estas características son aproximadamente iguales para cualquier sistema de transporte eléctricamente[25] accionado en una vía guía o con carriles[23], e incrementa la independencia de combustibles fósiles[27].

3. Ofrece una vista panorámica[14] superior, muy atractiva para centros turísticos con grandes flujos de pasajeros en actividades de esparcimiento masivas.

4. El tiempo de construcción es relativamente bajo[28], la tasa de construcción es aproximadamente 8Km/año, según Pyrgidis [14].

5. La adherencia del caucho en los neumáticos permite una mayor aceleración, curvas más cerradas y pendientes mayores en comparación a los sistemas de líneas de metros[14].

6. Es muy poco probable el descarrilamiento de los vehículos monorrieles[28], pero no imposible (Ver tabla 3). Es prácticamente imposible que el vehículo deje el canal de conducción, aunque no es imposible que se presenten otros tipos de problemas mecánicos. Los monorraíles suspendidos son a prueba del clima ya que son impermeables porque la lluvia y la nieve no se pueden incorporarse al canal de conducción, es decir, la ranura longitudinal está en la parte inferior, pero como menciona Vuchic [11], el efecto que puedan provocar los fuertes vientos sobre estos vehículos "*es otra historia*".

7. Los monorrieles tiene una cierta imagen progresista especial, lo cual contribuye a la estética de las ciudades[29]. El público asocia los monorrieles con el adelanto tecnológico, los conceptos visionarios y futuristas[23]. Esto puede ser considerado positivo y posiblemente produzca cierta consideración positiva del público y el apoyo cívico para la puesta en práctica de estas soluciones de transporte[11].

8. Como se había mencionado en líneas introductorias superiores, su gran fortaleza, es la capacidad de adaptarse mejor que las tecnologías ferroviarias convencionales a los tramos con curvas fuertemente pronunciadas, admitiendo radios de curvatura de 25 metros (20 metros[9]) con pendientes de hasta el 10% [2] donde las tecnologías ferroviarias convencionales no pueden. Por ejemplo, de acuerdo a, Timan[30], el sistema Monorraíl 300 puede lograr circular en pendientes de hasta el 6% y radios de curva de 46 m.

9. De acuerdo a Crăciun *et al.,* [17] y Qiang Guo *et al.,* [31] Qiang Guo *et al.,* [32], Kimijima *et al.,*[33] el intercambio « switching » del material rodante de una vía a la otra se resuelve utilizando bridas móviles o vigas de hormigón articuladas para poder cambiar el monorriel de una vía a la otra.

B. Desventajas

En cuanto a las desventajas, el monorriel presenta las siguientes limitaciones:

- El monorriel solo puede servir distancias pequeñas[14], en el orden de rango de 10km.
- Su capacidad de volumen de transporte es relativamente baja[14], aunque el sistema pueda llegar a una capacidad modular.
- No permite una conexión directa con las tecnologías convencionales ferroviarias (incompatibilidad del sistema monorriel con otros sistemas ferroviarios convencionales) [2].

- La evacuación de los trenes y el transporte de los pasajeros en caso de un accidente o inmovilización del monorriel en la plataforma de circulación, son complejos (especialmente en el caso de los sistemas monorrieles en suspensión)[14].

- La infraestructura y el material rodante a menudo son construidos por diferentes fabricantes, cuyas técnicas pueden ser incompatibles entre sí. A menudo, los fabricantes de material rodante lleguen a acuerdos con los proveedores de la infraestructura[14].

- El costo de la implementación es casi tres veces más alto que el costo de implementación del tranvía[14], sin embargo, es menor que el de un metro pesado. En Xu et al., [34] se indica que es entre 1/3 a un 1/2 menos costoso que un sistema metro convencional.

IV. Razones para elegir un sistema de transporte ferroviario tipo monorriel

De acuerdo a Vuchic [11], Pyrgidis [14], Monorail Society [4], Petersen[35], Nippon Koei Co., LTD[22], Ghafooripour *et al.,* [36], Kuwabara *et al*.,[20], Kato [37], Ross [38], Kera *et al.,* [39] , Sekilani *et al.,* [40] hay una serie de razones por las cuales se elige el sistema de transporte ferroviario, tipo monorail, siendo estas:

Los monorrieles son sistemas de transporte electrificado no contaminantes, silenciosos, seguros y con control automatizado. Debido al uso de neumáticos de goma, el ruido generado en la circulación del monorriel es menor que en las tecnologías ferroviarias convencionales con ruedas troncocónicas de acero. El viaducto elevado del sistema de transporte ferroviario tipo monorriel es el que menos sección transversal requiere en comparación con las tecnologías convencionales de transporte ferroviario, permitiendo mayor flexibilidad en el diseño de la alineación, minimizando la adquisición de terrenos circundantes.

V. Situación actual de los monorrieles

En resumen, la tabla 2 nos presenta un total de 26 monorrieles operativos en el mundo, de los cuales 14 se encuentran en el continente asiático, 8 en el conteniente americano, 1 en África y 3 en Europa. La tabla **2** es un resumen general de la situación actual de algunos sistemas monorrieles en el mundo, pudiendo existir otros sistemas de monorrieles en diseño y construcción actualmente. Como se puede apreciar en la tabla 2 la mayor parte de los monorrieles son de tipo apoyado (Straddle monorail). Los monorrieles están

destinados a satisfacer las necesidades de conexión con los aeropuertos, actividades turísticas y de movilidad en espacios de esparcimiento y el transporte urbano.

Tabla 2 Situación actual de monorrieles

A: Monorriel apoyado. (Straddle monorail). S: Monorriel suspendido. (Suspended monorail). C: Monorriel experimental (1): Número de estaciones	(2): L: Longitud de la línea (3): Velocidad promedio (km/h) (4): Velocidad máxima (km/h) (5): Uso del monorriel, 5A: conexión aeropuerto, 5B: Turismo, espacios recreativos, 5C: Transporte urbano	(6): Demanda diaria (7): Demanda anual (8): Número de líneas

	(1)	Tipo		Km	Km/h	Km/h		pasajeros		
País, ciudad	**(1)**	**A**	**S**	**(2)**	**(3)**	**(4)**	**(5)**	**(6)**	**(7)**	**(8)**
Wuppertal, Alemania	20	-----	X	13.3	----	-----	5C	82000(2015)	---	1
Japón, Tokio	11(10)	X	-----	17.8	45	80	5A,5C	311,856	---	
Japón, Tama Toshi urban	19	X	-----	16.1	65	---	5C	120,494	---	1
Japón, Osaka	18	X	-----	28	---	75	5A-C	100,602	---	2
Japón, kitakyushu	13	X	-----	8.8			5C	31,700	---	1
Japón, Okinawa	19	X	-----	17	28	65	5A	35000	---	1
Japan, Shiba	18	-----	X	15.2	---	---	5A	45,430 (2008)	---	2
Malasia, Kuala Lumpur	11	X	-----	8.6	60	80	5B	68,679 (2015) 63,778 (2017)	25.067 M (2015) 23.279 M (2017)	1
EUA, Florida, Jackson ville	8	X	-----	4	56	---	5C	5,000 (2015)	---	1
EUA, Las Vegas	7	X	-----	6.3	80	---	5B, 5C	13,510 (2011)	---	1
EUA, Disneyland	6	x	-----	23.66	64	89	5B	150000	---	3
Seattle, USa	2	X	-----	1.54	70	---	5C	7000	2,021,780 (2018)	1
Memphis or Mudisland, USA	2	-----	X	0.518		---	5B	---	---	1
Emiratos Arabes Unidos, Dubai Palm Jumerirah	4	X	-----	5.45	35	70	5B	40000	---	1
China, Chongqing	126	X	-----	213	40	75	5C	1.73 M (2015)	630 M (2015)	4
****China, hanghai-Maglev***	2	X	-----	30.5	251	431	5C	---	---	1
China, Shenzhen (happy line)	7	X	-----	4.5	---	40	5B	---	---	1
China, Shenzhen	3	X	-----	1.7	---		5B	---	---	1
China, Xian	11	X	-----	9.6	---	40	5C	---	---	1
Nigeria, Calabar	3	X	-----	1.7	---	40	5C	---	---	1
España, Zaragoza	2	X	-----	0.6	---	---	5B	---	---	1
Sao Paulo, Brazil	10	X	-----	11.7	---	---		---	---	---
Moscu, Rusia	6	X	-----	4.7	---	---	5B, 5C	---	---	1
Honolulu, EUA	2	X	-----		---	---		---	---	1
Bombay, India	3	X	-----	19.54	---	---	5C	---	---	1
Airtrain, EUA	4	X	-----	4.8	---	---	5C	---	---	1

Fuente: [9] [41] [42] [43] [44] [45][46] [47] [48] [49] [50]

El monorriel de Wuppertal, Alemania es el más antiguo del mundo que se encuentra operative [51]. El monorriel de chiba se encuentra en Japón y es el monorriel suspendido más largo de todo el mundo con una longitud de 15,2 kilómetros [52].

VI. ACCIDENTES DE MONORRIELES

Los accidentes de monorrieles son relativamente escasos en comparación con los accidentes ferroviarios acaecidos en las tecnologías ferroviarias convencionales (metro, ferrocarril, tren ave, tranvía), ya que hay muchísimo menos cantidad de vías ferroviarias tipo monorriel en el mundo y también por el sistema de guiado tipo monoviga del monorriel dificulta el descarrilamiento.

La tabla 3 presenta un listado histórico de accidentes ferroviarios de los sistemas monorrieles y presenta un resumen de 39 accidentes de monorrieles comprendidos en el periodo del año 1879 al 2015.

Estos accidentes se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Para la categoría descarrilamiento (C1) se presentan 6 accidentes. En la categoría C2, colisiones con otros trenes, se presentan 2 accidentes. La categoría C3, colisiones con otros vehículos comprende, 2 accidentes. La categoría C4, colisiones con otros objetos, presenta 2 accidentes. La categoría C5, incendios, presenta 4 accidentes y la categoría C6, presenta 14 accidentes de monorrieles. Sin embargo, la tabla 3 se presenta una lista resumida de algunos accidentes en los sistemas de transporte tipo monorriel (ver tabla 3).

Tabla 3. Listado histórico de accidentes ferroviarios de los monorrieles

(1)	(2)	(3)	(5)	(6)	(7)
C1	Bradford and Foster brook line	1879	Mckean County, Pennsylvania (USA)	6 muertos y explosión	[53]
	Bronx tunis	1910	New York, USA	1 pasajero lesionado	[54]
	Los Angeles County fairs	1963	Los Angeles, USA	----------	[55]
	Texas Hemis fair	1968	Texas, USA	1 muerto y 48 heridos	[56]
	Philadelphia Zoo monorail	1969	Filadelfia, USA	----------	[57]
	Wuppertal suspended monorail	1999	Alemania, Wuppertal	5 muertos y 49 heridos	[41]
C2	Wuppertal Schwebebahn	1917	Alemania, Wuppertal	2 heridos leves	[41]
	Wuppertal Schwebebahn	1997	Alemania, Wuppertal	14 heridos	[41]
	Disneyland monorail	1974,1976	USA, Florida	2 turistas heridos y 1 empleado hospitalizado	[58]
	Toronto Zoo monorail	1991	Toronto, Canadá	9 afectados	[59]
	Toronto zoo monorail	1994	Toronto, Canadá	----------	[59]
	Disney monorail	1991	Disneyland, USA	2 trabajadores heridos	[58]
	Butlin´s somerwest world holiday camp, minehead	1996		----------	[12]
	Seattle monorail	2005	Seattle, USA	2 pasajeros hospitalizados	[60]
	Disneyland monorail	2009	Disneyland, USA	1 muerto(conductor)	[58]
	Minnesota zoo monorail	2010	Minnesota, USA	----------	[12]
	Sydney monorail	2010	Sydney, Australia	4 personas hospitalizadas	[61]
C3	Tokio	2007	Tokio, Japón	1 mujer hospitalizada y 130 personas rescatadas	[62]
	Wuppertal sistema	2008	Alemania, Wuppertal	1 conductor de tren herido, 1 conductor de autobús y pasajeros en “shock”	[41]
C4	Seattle monorail	1971	Seattle, USA	26 pasajeros heridos	[60]
	Transrapid Maglev	2006	Alemania, Lahen	26 muertos	[63]
C5	Disney monorail	1985 1996 2014	Disneyland, USA	1985: incendio y evacuación 1996: 2 trabajadores afectados2014:	[58]
	Fashion Island shopping mail in Bangkok	2002	Bangkok, Tailandia	2 niñas muertas y 2 niños heridos	[64]
	Seattle monorail	2004	Seattle, USA	5 pasajeros en hospital con heridas leves	[60]
	Kuala Lumpur monorail	2015	Kuala Lumpur, Malasia	----------	[65]
C6	Wuppertal	1950	Alemania, Wuppertal	Un elefante, 2 periodistas y 1 pasajeros con heridas leves.	[41]
	Disneyland	1966 2015(2)	Disneyland, USA	----------	[58]
	Wuppertal Swebebahn	1968	Alemania, Wuppertal	Choque de camión sobre pilotes. No hubo heridos	[41]
	MudIsland monorail	1994	Memphis, USA	1 muerta por accidente laboral	[66]
	Kuala Lumpur monorail	2002	Kuala Lumpur, Malasia	1 periodista hospitalizado por lesiones en el proceso de ingeniería de pruebas	[67]
	Kuala Lumpur monorail	2003	Kuala Lumpur, Malasia	----------	[67]
	Kuala Lumpur monorail	2005	Kuala Lumpur, Malasia	2 damas afectadas	[67]
	Kuala Lumpur monorail	2012	Kuala Lumpur, Malasia	183 pasajeros atrapados y luego 6 días después 200 pasajeros atrapados	[67]
	Okinawa monorail	2003	Japón, Okinawa	----------	[68]
	San Diego Wild Animal Park monorail	2004	San Diego, USA	----------	[69]
	Las Vegas monorail	2004	Las Vegas, Nevada, USA	----------	[69]
	Skytrain Vancouver		Vancouver, Canadá	----------	[70]
	Wuppertal	2013	Alemania, Wuppertal	Daño a automóviles, 70 pasajeros rescatados. No hubo heridos.	[41]

(1): Tipo de accidente, (2) nombre del monorriel, (3) fecha de accidente, (5) Localización, (6) Referencia, (7) Detalle de afectados. C1: descarrilamiento C2: colisiones con otros trenes C3: colisiones con otros vehículos C4: colisiones con otros vehículos C5: incendios C6: otros accidentes

VII.PROYECTO DE LA LINEA 3 DEL SISTEMA FERROVIARIO DE LA CIUDAD DE PANAMÁ

Con relaciona al proyecto de la línea 3 de la red ferroviaria urbana de la Ciudad de Panamá, el cual se encuentra común porcentaje de avance del 16%[71]. Para efectos de nuestro país, Panamá, la definición de monorriel, de acuerdo al Metro de Panamá[72], corresponde a: *“un sistema de tren que se desplaza sobre la superficie superior de una viga de rodaje de hormigón o acero y se sujeta de manera lateral por medio de neumáticos de caucho para la tracción y la estabilidad. Su sistema de propulsión es por medio de motores eléctricos alimentados por contactos sujetados de la viga de rodaje. La viga de rodaje es soportada por una estructura elevada”.*
Se desarrollará en dos fases. La primera hasta el sector de Ciudad del Futuro, distrito de Arraiján, donde estarán ubicados los Patios y Talleres de la línea, y una segunda fase hasta la Chorrera[73].(Ver figura 3)

A. Descripción técnica de la línea 3 tipo monorriel de la Ciudad de Panamá.

En su primera etapa contará con 14 estaciones [21] ubicadas en sitios estratégicos y se contemplan estaciones con intercambiadores de buses transporte público y estacionamientos. Se estima una demanda de 20,000 pasajeros en hora pico en su fase 1[74], con un intervalo entre trenes menor de 4 minuto. Se contempla una demanda aproximada de 160 mil pasajeros[75].La Línea 3 partirá de la Estación de Albrook y recorrerá Arraiján, Nuevo Chorrillo y llegará a Ciudad del Futuro. Tendrá un recorrido en su primera fase de 24.5 kilómetros de trayecto, a lo largo del cual se distribuirán 14 estaciones. Su trazado contempla un tramo soterrado, con una longitud aproximada de 5.3 kilómetros[73]. La longitud total corresponde a 26,7 km en doble vía, cada tren tendrá 6 vagones. Los patios y talleres comprenden un área de 27 hectáreas[74]. De Albrook a Arraiján el trayecto estaría tomando 20 minutos, mientras que de la Ciudad del Futuro a Albrook, el recorrido completo de la línea, tomaría menos de 45 minutos[74].

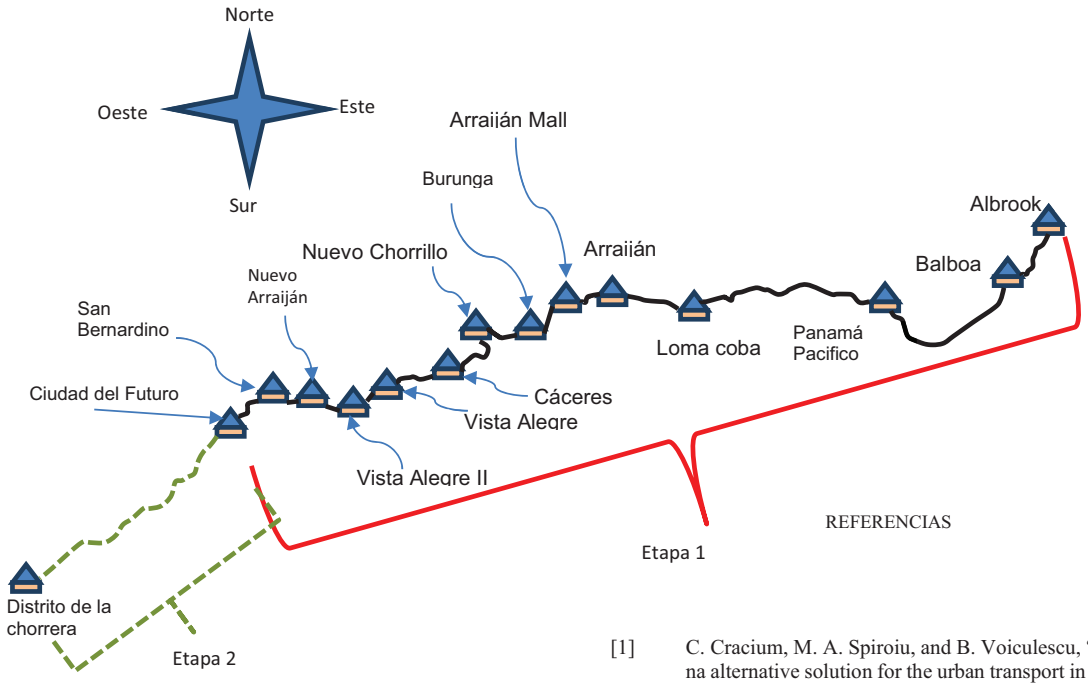


Figura 3. Esquema de la ruta y etapas de la línea ferroviaria 3 (monorriel) de la ciudad de Panamá. Elaboración propia partir de la página Web línea 3 metro de Panamá.

CONCLUSIONES

Los monorrieles son tecnologías ferroviarias no convencionales. Su elección por sobre sistemas de transporte masivo de pasajeros tipo tranvía, metro ligero y metro pesado se basan en sus fortalezas, que son pendientes pronunciadas y radio de curvas más pequeños que las tecnologías ferroviarias convencionales. Los sistemas de transporte ferroviarios tipo monorrieles se clasifican de acuerdo con su relación con el elemento de guía o monoviga a través del cual discurre el material rodante. En este sentido, son de dos tipos: monorriel apoyado o monorriel suspendido. En cuanto a la configuración del sistema monorriel, en función de su capacidad de transporte de pasajeros, se tiene dos tipos uno a escala pequeña y otra a escala grande(convencional). En general los sistemas de transporte tipo monorrieles han tenido una expansión durante las décadas recientes, estos se encuentran en países como: Japón, China, Estados Unidos de América, Emiratos Árabes, Malasia y (Sao Pablo) Brasil.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Panamá por su apoyo para la elaboración de este artículo de investigación.

[1] C. Cracium, M. A. Spiroiu, and B. Voiculescu, “Monorial-na alternative solution for the urban transport in Romania,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 444, 2018.

[2] C. Zamorano, J. Bigas, and J. Sastre, *Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas de plataforma reservada*, Primera. Madrid, España: Consorcio Regional de Transporte de Madrid, 2006.

[3] *The Transport and Works (Guided Transport Modes) Order 1992. N° 3231. Article 3*. United Kingdown, 1992.

[4] Monorail Society, “The Monorail Society,” *General Web page*, 2016. http://www.monorails.org/tMspages/WhatIs.html.

[5] M. M. Abdel Wahed Ahmed and N. Abd El Monem, “Sustainable and green transportation for better quality of life case study greater Cairo – Egypt,” *HBRC Journal*, vol. 16, no. 1. pp. 17–37, 2020, doi: 10.1080/16874048.2020.1719340.

[6] F. Yildizhan and M. Karacasu, “Monorail systems feasibility study for developing countries: the case study of Eskisehir-Turkey,” *J. Polytech.*, pp. 1–11, 2021.

[7] L. Xi and L. Fang-gang, “Optimization Study on the Influencing Factors for Tire Wear in Chongqing Monorail Transit Line 3,” *Int. J. Eng. Res. Tecnol.*, vol. 3, no. 4, 2014.

[8] Hmong, “Línea feliz,” *Hmong*, 2022. https://hmong.es/wiki/Happy_Line (accessed May 15, 2022).

[9] Intamin Transportation, “People Mover P8 Light Monorail for City Transportation Our Flexible-Size Solution for your City Transportation.” Intamin Transportation LTD, Florida, USA, p. 4, 2022, [Online]. Available: http://data.sphosting.ch/Intamin/Media/People Mover P8/People Mover P8.pdf.

[10] World news headlines, “Línea feliz - Happy Line,” *News Directory world news headlines*, 2022. https://dir.md/wiki/Happy_Line?host=es.qwe.wiki (accessed May 15, 2022).

[11] V. Vuchic, *Urban Transportation Systems*. 2005.

[12] David Voice, *Monorails of the World. A history of Passenger Monorails.* Published by Adam Gordon. ISBN 978-1-874422-81-5. 2010., 2010.

[13] JICA, “CHAPTER 5 Monorail System and Structures 5.1 Outline of Monorail System 5.1.1 Outline of Monorail System,” in *Preparatory Survey for New Integrated Urban*

Public Transport System Introduction Project, 1st ed., JICA, Ed. JICA, 2022, p. 1.

[14] C. N. Pyrgidis, *Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation*, Edición 1. Boca Ratón, Florida: Taylor and Francis Group, 2016.

[15] C. H. Lee, M. Kawatani, C. W. Kim, N. Nishimura, and Y. Kobayashi, "Dynamic Response of a Monorail Steel Bridge under a Moving Train," *J. Sound Vibrat ion,294(3)562-579*, vol. 294, no. 3, pp. 562–579, 2006.

[16] Reinhard Krischer, "The Alweg archives. Alweg Monorail rapid transit," 2015. .

[17] C. I. Crăciun, M. A. Spiroiu, and B. Voiculescu, "Monorail - an alternative solution for the urban transport in," *8th Int. Conf. Adv. Concepts Mech. Eng. Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 444 072009 doi10.1088/1757-899X/444/7/072009*, vol. 444, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/444/7/072009.

[18] S. Kikuchi and A. Onaka, "Monorail development and application in Japan," *J. Adv. Transp.*, vol. 22, pp. 17–38, 1988, [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/atr.5670220103.

[19] K. Szewerda, J. Tokasrczyyk, and A. Pytlik, "Suspended monorail emergency braking trolley computational model verification based on bench tests," in *IOP Conf. Series: Earth and Enviroamental Science*, 2019, p. 012052.

[20] Takeo Kuwabara, M. Hiraishi, K. Goda, S. Okamoto, A. Ito, and Y. Sugita., "New Solution for Urban Traffic: Small-type Monorail System.," *Hitachi Rev.*, vol. 50, no. 4, pp. 139–143, 2001.

[21] Wikipedia, "Hitachi Monorail," *Fundación Wikipedia*, 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Hitachi_Monorail#Panama_Metro_Line_3_Project (accessed May 15, 2022).

[22] JICA, "Pre-feasibility study on the development of mass transit system in Panama City. Final report," Japan, Tokyo, 2008.

[23] A. Berbey-Álvarez and R. Caballero-George, "Informe técnico de la Etapa I del proyecto de I+D 'Metodologías e índices de desempeño para sistemas de transporte ferroviario' 2009-2010," *Repositorio institucional Ridda2-utp*, 2010. https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/13350 (accessed Mar. 13, 2022).

[24] P. Miller, S. C. Wirasinghe, L. Kattan, and A. De Barros, "Monorails for sustainable transportation – a review," in *CSCE 2014 General Conference -Congrès général 2014 de la SCGC*, 2014, no. May, pp. 1–13, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Patrick-Miller-6/publication/301302321_Monorails_for_sustainable_transportation_-_a_review/links/57114aed08aeebe07c0242e2/Monorails-for-sustainable-transportation-a-review.pdf.

[25] N. Truong, K. H-S, I. Kim, N. D, and L. Bao, "Design and simulation of a monorail Network for the Inter-terminal Transport," *J. Naving. Port Res.*, vol. 44, no. 5, pp. 382–390, 2020.

[26] V. Cingoski and B. Petrevska, "A new long-term sustainable public transportation systems for the city of Skopje," 2018.

[27] N. Muda, N. Suradi, and N. Roji, "Penalty-rewards contrast analysis (PRCA) on the KL Monorail services," in *AIP conf. Proc.*, 2013, pp. 1477–1482.

[28] W. E. Rice, "The potential application of monorail technology as a tool for economic redevelopment-a case study Fresno, California," *Trans. Built enviromental*, vol. 52, pp. 107–115, 2001.

[29] P. E. Timan, "Why Monorail Systems Provide a Great Solution for Metropolitan Areas," *Urban Rail Transit*, vol. 1, no. 1. pp. 13–25, 2015, doi: 10.1007/s40864-015-0001-1.

[30] P. E. Timan, "Why Monorail Systems Provide a Great Solution for Metropolitan Areas," *Urban Rail Transit*, vol. 1, pp. 13–25, 2015, doi: 10.1007/s40864-015-0001-1.

[31] Q. Guo, P. Wang, J. Xu, H. Yu, Hao Yu, and C. Li, "Research on Reasonable Line Type of Suspended Monorail Turnout Research on Reasonable Line Type of Suspended Monorail Turnout," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 439 042077*, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/439/4/042077.

[32] Q. Guo, P. Wang, J. Chen, J. Xu, and H. Xu, "Dynamic Analysis on Suspended Monorail Vehicles Passing through Turnouts Dynamic Analysis on Suspended Monorail Vehicles Passing through Turnouts," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 439 042078 doi10.1088/1757-899X/439/4/042078*, vol. 439, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/439/4/042078.

[33] Nobuhiko Kimijima, H. Takahashi, I. Kawabata, and S. Matsuo, "New Urban Transport System for Middle East Monorail System for Dubai Palm Jumeirah Transit System," vol. 59, no. 1, pp. 47–51, 2010.

[34] Z. Xu, Z. Du, Z. Yang, and L. Chen, "Research on Vertical Coupling Dynamics of Monorail Vehicle at Finger-Band," *Urban Rail Transit*, vol. 3, no. 3. pp. 142–148, 2017, doi: 10.1007/s40864-017-0065-1.

[35] K. Petersen, *Monorails. Trains of the future- Now arriving. Published by the monorail society*, First. Kentucky, USA: The monorail society, 2015.

[36] S. Ghafooripour, A., Ogwuda, O. & Rezaei, "An efficient cost analysis of monorail in the middle east using statistics of existing monorail and metro models.," in *Urban Transport XVIII. WIT Transactions on the Built Enviroment, Vol 128, Wit Press www.witpress.com, ISSN 1743-3509.Page .2012.*, 2012, pp. 241–252.

[37] M. Kato, K. Yamazaki, T. Amazawa, and T. Tamotsu, "Straddle-type Monorail Systems with Driverless Train Operation System," *Hitachi Rev. Vol. 53 (2004), No. 1 27*, vol. 53, no. 1, pp. 25–29, 2004.

[38] David Ross. (Editor General), *La enciclopedia de trenes y locomotoras. Una guía exhaustiva con más de 900 máquinas de vapor, diesel y eléctricas desde 1825 hasta nuestros días.* 2013.

[39] Kazuo kera, E. Isobe, and S. Kawahata, "Hitachi´s iniciatives in addressing the challenges of 21 st Century Railway Systems.," *Hitachi Rewiew*, vol. 48, no. 3, pp. 126–133, 1999.

[40] Taketoshi Sekitani, M. Hiraishi, S. Yamasaki, and T. Tamotsu, "China ' s First Urban Monorail System in Chongqing," *Hitachi Rev. Vol. 54 (2005), No. 4 195*, vol. 54, no. 4, pp. 193–197, 2005.

[41] Wikipedia, "Wuppertaler Schwebebahn," *Wikipedia. Wuppertaler Schwebebahn*, 2017. https://es.wikipedia.org/wiki/Wuppertaler_Schwebebahn.

[42] P. Miller, S. C. Wirasinghe, L. Kattan, and A. De Barros, "Monorails for sustainable transportation-a review," in *CSCE 2014 General Conference*, 2014, pp. 1–13, [Online]. Available: http://manigolparvar.com/ConferencePapers/MGF_FPM_SS_CanadianConstructionForum_2009.pdf.

[43] Monorail Osaka, "Monorail Osaka.," *Monorail Osaka(english)*, 2017. http://www.osaka-monorail.co.jp/eng/.

[44] M. Sugawara, "Urban Transportation in Asian Counties," *Japan Railw. Transp. Rev.*, vol. March, pp. 23–29, 1995.

[45] K. Hasnan, D. Didane, M. Kamarudin, Q. Bakhsh, and R. Abdulmalik, "Development of a simulation model of semi-active suspension for monorail," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 160, no. 012029, pp. 1–10, 2016.

[46] Wikipedia, "List of monorails," *Fundación Wikipedia*,

2022. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_monorail_systems#Africa (accessed May 15, 2022).
[47] H. Tateya, H. Yamamoto, T. Inoue, and T. Tamotsu, "Integrated monorail systems extending around the globe," *Hitachi Rev.*, vol. 57, no. Feb, pp. 56–60, 2008.
[48] H. Wang, E. Zhu, and Z. Chen, "Dynamic Response Analysis of the Straddle-Type Monorail Bridge–Vehicle Coupling System," *Urban Rail Transit*, vol. 3, no. 3. pp. 172–181, 2017, doi: 10.1007/s40864-017-0069-x.
[49] Francisco Javier González Fernández and Julio Fuentes Losa, *Sistemas ferroviarios: planificación, ingeniería y explotación*, Primera. Madrid, España: UNED, 2019.
[50] Wikipedia, "AirTrain Newark," *Fundación Wikipedia*, 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/AirTrain_Newark (accessed May 16, 2022).
[51] Hmong, "Monocarril," *Hmong*, 2022. https://hmong.es/wiki/Monorail (accessed May 15, 2022).
[52] Structuralia, "Monorrieles en el mundo," *Ferrocarriles*, 2015. https://blog.structuralia.com/monorrieles-en-el-mundo (accessed May 15, 2022).
[53] L. Kilmer, W. Bradford, and F. Brook, "Peg Leg Railroad. p. 36.," *Local history & genealogy*, 2022. https://www.alleganyhistory.org/index.php/culture/transportation/miscl-railroad-articles/2073-the-qpeg-legq-railroad.
[54] The New York Times, "Monorail Car Fails on its First Trip - Flimsy Structure Supporting It Gives Way and Many Are Badly Hurt. - Fall to the Floor in Layers," *The New York Times*, New York, 1910.
[55] L. Leach, "Los Angeles County Fair," *Los Angeles Public Library Photo Collection*, 1963. https://calisphere.org/item/050f4e10ef2903619c8bfeff7a7cd103/ (accessed Oct. 13, 2022).
[56] Stu Beitler, "San Antonio, TX HemisFair Monorail Accident," 1968.
[57] D. Simons, "Monorails - Philadelphia Zoo, Pennsylvania," *Novelty Monorails*, 2022. https://www.monorails.org/tMspages/PhilzooN.html.
[58] Wikipedia, "Incidents at Walt Disney World," *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Incidents_at_Walt_Disney_World.
[59] Wikipedia, "Toronto Zoo Domain Ride," *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Toronto_Zoo_Domain_Ride#Accidents.
[60] Wikipedia, "Monorail Seattle," *Monorail Seattle*, 2017. https://en.wikipedia.org/wiki/Seattle_Center_Monorail (accessed Oct. 13, 2022).
[61] A. McClintock, "Four hurt in Monorail collision," *Sydney Morning Herald*, 2010. https://www.dailytelegraph.com.au/news/nsw/four-injured-in-sydney-monorail-crash/news-story/8c3b89025e845c85641969bbde7f131a (accessed Oct. 13, 2022).
[62] Japan transportation scan, "Accident Suspends Tokyo Monorail to Haneda Airport. MAR 27, 2007," *Aviation pros*, 2007. http://www.aviationpros.com/news/10391221/accident-suspends-tokyo-monorail-to-haneda-airport (accessed Oct. 13, 2022).
[63] Wikipedia, "Lathen train collision," *Fundación Wikipedia*, 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Lathen_train_collision. (accessed Oct. 13, 2022).
[64] Kim Petersen, "Fire and Evacuation," *Monorail society*, 2015. http://www.monorails.org/tMspages/KimEd3.html (accessed Oct. 13, 2022).
[65] "Temporary suspension of KL Monorail service. March 30, 2015 12:40 MYT.," *malaysia-news*, 2015.
[66] Wikipedia, "Monorail Memphis or Mudisland," *Monorail Memphis or Mudisland*, 2017. https://en.wikipedia.org/wiki/Memphis_Suspension_Railway (accessed Oct. 13, 2022).
[67] Monorail Kuala Lumpur., "Monorail Kuala Lumpur. Búsqueda Febrero 2017," *Monorail Kuala Lumpur.*, 2017. .
[68] Wikipedia, "Monorail Okinawa," *Wikipedia*, 2017. https://en.wikipedia.org/wiki/Okinawa_Urban_Monorail.
[69] Wikipedia, "Monorail Las Vegas," *Monorail Las Vegas*, 2017. https://en.wikipedia.org/wiki/Las_Vegas_Monorail.
[70] Bob Mackin, "SkyTrain deaths examined. Could TransLink do more to prevent fatalities?," 2015. http://www.straight.com/life/458271/skytrain-deaths-examined.
[71] Y. Sandoval, "Línea 3 del metro estaría operativa en 2026," *Noticia Megaobra*, 2022. https://www.prensa.com/economia/linea-3-del-metro-estaria-operativa-en-2026/ (accessed Sep. 06, 2022).
[72] Metro de Panamá, "Pliego de precalificación de la línea 3 del Metro de Panamá. Proyecto de ingeniería de diseño, de construcción de obras civiles, instalaciones auxiliares de línea y estaciones suministro e instalaciones integral del sistema ferroviario que incluye el mate," Panamá, República de Panamá, 2016.
[73] Metro de Panamá, "Proyecto de la linea 3 del metro de Panamá," *Proyecto línea 3*, 2022. https://www.elmetrodepanama.com/linea-3/ (accessed Feb. 15, 2022).
[74] HPH consorcio, "Generales del proyecto. Conoce la línea 2." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 1, 2022, [Online]. Available: https://consorciolinea3.com/linea-3-del-metro.
[75] Metro de Panamá, "Proyecto de la línea 3 del metro de Panamá," *Diseño/operación*, 2022. https://www.elmetrodepanama.com/linea-3/#tab-id-2 (accessed Feb. 15, 2022).

Warehouse management model integrating BPM-Lean Warehousing to increase order fulfillment in SME distribution companies

Kevin Luis Ambrosio-Flores
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
20162814@aloe.ulima.edu.pe

Maria Lazo-de-la-Vega-Baca
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
20173528@aloe.ulima.edu.pe

Juan Carlos Quiroz-Flores
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
jcquiroz@ulima.edu.pe

Ezilda Cabrera-Gil-Grados
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
ecabrera@ulima.edu.pe

***Abstract*— In many cases, warehouse logistics in the distribution SMEs usually do not have a standardization, structure, and methodology for the reception, storage, and dispatch. Most of the flows within the warehouse tend to occur over time, but there is no feedback or a choice of logistics tools to make it more efficient. This lack of tools causes problems such as a non-existent flow of information, a lack of warehouse organization, inventory control, and a non-existent work protocol. These problems cause the customer satisfaction index to shallow since mishaps usually occur during order delivery. The general objective of this research is to increase the indicator of complete orders, so the root causes of the problem are identified and quantified. After that, a model based on implementing Lean Warehousing tools such as multi-criteria ABC, 5S, Kardex and work standardization, and BPM methodology was also applied. Subsequently, the model's reliability was guaranteed using a simulation through Arena software and a pilot test. Finally, the model increased the indicator of orders entirely delivered by 12%. Likewise, as a secondary consequence, other indicators were increased: inventory record accuracy, location registration accuracy, coverage, cycle time, and productivity by 16%, 32%, 57%, 3%, and 24%, respectively.**

Key words — Lean warehousing, ABC, 5S, Kardex, Work Standardization, BPM

I. INTRODUCTION

Many companies, especially those that involve warehousing processes, constantly deal with inventory shortages. This situation affects the company a lot since the customer usually has three options: change store, change the outcome, or postpone the delivery time when not finding the product. The first has a negative effect, and the other has a relatively positive impact—total sales losses caused by the out-of-stocks amount to 3.9% worldwide [1].

In addition to direct sales losses, a stock-out situation can also cause indirect adverse effects such as higher inventory holding costs, inaccurate information exchange, and poor sales planning [2]. However, for retailers, one of the biggest problems is the decreased store loyalty [3], which could cause a deficit in the company's long-term business performance. The annual cost of permanent loss of shoppers to competitors is estimated at US$ 1 million per 200 shoppers [4].

For these reasons, retail companies face various challenges and problems related to inventory and customer satisfaction. Since the pandemic, E-commerce models have been boosted in all countries. However, in Peru, the process is slower because they use the traditional channel, such as going to the market or the warehouse. "Normally, a retailer attended the e-commerce channel sporadically, but that was transformed, and due to the pandemic, the warehouse capacities for picking, the warehouse capacities for bagging and packing quickly were saturated," said Hernán Carranza, CEO of NetPartners International [5].

Therefore, due to the current new context, retail distribution companies need a proper model for establishing inventory plans to ensure product availability at the right place and the right time for the customer. That said, it is crucial to ensure inventory availability to minimize stock-outs and keep customer satisfaction high, as this directly impacts sales. For this reason, warehouse management and information integration within retail distribution companies is a significant challenge.

It is necessary to design a logistics chain that manages with maximum efficiency and quality levels the fulfillment process of orders (warehousing, order preparation, and shipping), as well as delivery under conditions that are not always favorable. One of the most accurate indicators for measuring warehouse management in trading companies is perfect order fulfillment [6].

One of the conditions for perfect order fulfillment is the execution of deliveries made entirely in quantity between what is offered to the customer and what is shipped to the customer.

Therefore, it was decided to focus the following case study on improving the indicator of complete orders in a construction materials trading company. This indicator was achieved through a model where Lean Warehousing tools such as ABC multicriteria, 5S, Kardex, and Standardization of work were applied; also, the BPM methodology was used. Our research contributes to offering a clear perspective to company managers who wish to implement a warehouse system and have doubts about the process and its benefits.

II. LITERATURE REVIEW

A. Lean Warehousing in the processes of storing materials of the construction industry and similar

Warehousing combines a range of tools based on the Lean philosophy, which is intended to be applied in companies' warehouse systems to increase effectiveness and efficiency

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00012

[7]. Despite this, implementing warehouse operations based on the Lean philosophy has not received much attention.

Many authors highlight that Lean Warehousing is a relatively new topic; therefore, there is not much scientific evidence. [8] [9]. Even so, the authors emphasize that Lean Warehousing tools have led to an improvement in logistics processes such as warehousing, especially in space utilization, reduction of picking time, and reduction of transportation costs. Applying these tools in a warehouse increases the company's productivity in general by improving working conditions to reduce downtime and distances. [10] [11].

B. *BPM in the processes of storing materials of the construction industry and similar*

Business process management (BPM) refers to process execution using workflow engines, application integration, and web services [12], For example, IBM, FileNet, and Staffware. Applying BPM will make companies more agile through designing, implementing, and monitoring complex business processes. BPM involves not only technology to automate processes but also an approach to change in an organization using various techniques [12]. Understanding organizational configurations, departmental functions, and determining the scope of work are the main objectives of process mapping [13] because "collaborating your business processes with other organizations becomes even more difficult if you do not understand yours" [12]. Therefore, understanding the business processes is obtained as a construction of the system using a visual method, a diagram to simplify it, and then analyzing every detail [14].

C. *Standardization of the work in the processes of storing materials of the construction industry and similar*

Process standardization is a framework that aims to achieve standardized work. Companies increase short-term organizational performance by doing so, resulting in productivity and completion times [15]. According to related research, standardized work is one of the most employed methods to define a specific job. This statement reinforces and validates the safety and efficiency of the tool for any process that aims to meet the completion of the process on time and quality. [16]. Many companies, especially in production, adopt work standardization as a first step toward improving their operational management. As Ohno Toyota (2019) mentions: "Where there is no standard, there can be no improvement ."That is why it is an essential and fundamental step within the operational optimization of any process or activity [17].

D. *5S y ABC in the processes of storing materials of the construction industry and similar*

Many distribution centers use ABC classification to organize their inventories. By dividing research objects into A, B, and C through mathematical statistics, targeted management can be more efficient. The cumulative frequency of A factors is 0% to 80%, which is the primary influence factor; the cumulative frequency of B factors is 80%-90%, which is the secondary influence factor; and the cumulative frequency of C factors is 90%-100%, which is the general influence factor. [18]. On the other hand, the 5S system is a systematic approach that organizes and standardizes the workplace. This methodology makes it possible to increase occupational safety, improve workflow, increase product quality, optimize stock management, and improve the efficiency of work area controls [19].

III. CONTRIBUTION

A. *Model Bases*

For this purpose, tools such as ABC multicriteria and 5S were used to reorganize and improve the warehouse. Likewise, the Kardex tool was used to control the company's inventories. Additionally, a standardized work design and time study were implemented to increase the warehouse operational processes' productivity and total lead time. Finally, the BPM tool was used to improve the management of business processes, which influences the speed at which information is delivered to the company's warehouse.

Based on the diagnosed problems, a literature review was conducted to corroborate whether the tools used by other authors were viable for this research. In addition, they were used as a guide for their application.

The authors emphasize that Lean Warehousing tools improve logistics processes such as warehousing, especially in space utilization, picking time reduction, and transportation cost reduction. Applying these tools in a warehouse increases the company's productivity in general by improving working conditions to reduce downtime and distances. [20] [21].

A type in the food sector and another in the sector used the BPM methodology to improve its indicator of complete orders and indicator of perfect orders. As a result, process efficiency and stock reduction were generated; for the latter, an increase in the target indicator and service level was generated [22][23].

A 20.55% reduction in cycle time was demonstrated within a company's poultry sector's dispatch processes concerning the company's initial situation. This improvement was achieved after applying process standardization and other tools to reduce the number of returns. [24].

An SME in the food sector employed a model to reduce lead time using Lean Warehousing tools, including ABC and 5S. These contributed to better management of raw materials in the warehouse, thus ensuring their safety and shelf life to generate additional purchases, reducing the company's cost and time loss [22]. In addition, it is proved by other literature reviews that the 5S tool allows for standardizing, ordering the warehouse area, facilitating the management of materials, and achieving greater efficiency.

Likewise, the ABC tool is efficient for controlling warehouse inventories, increasing efficiency, and reducing costs through a new warehouse layout made after applying the ABC method [25] [26].

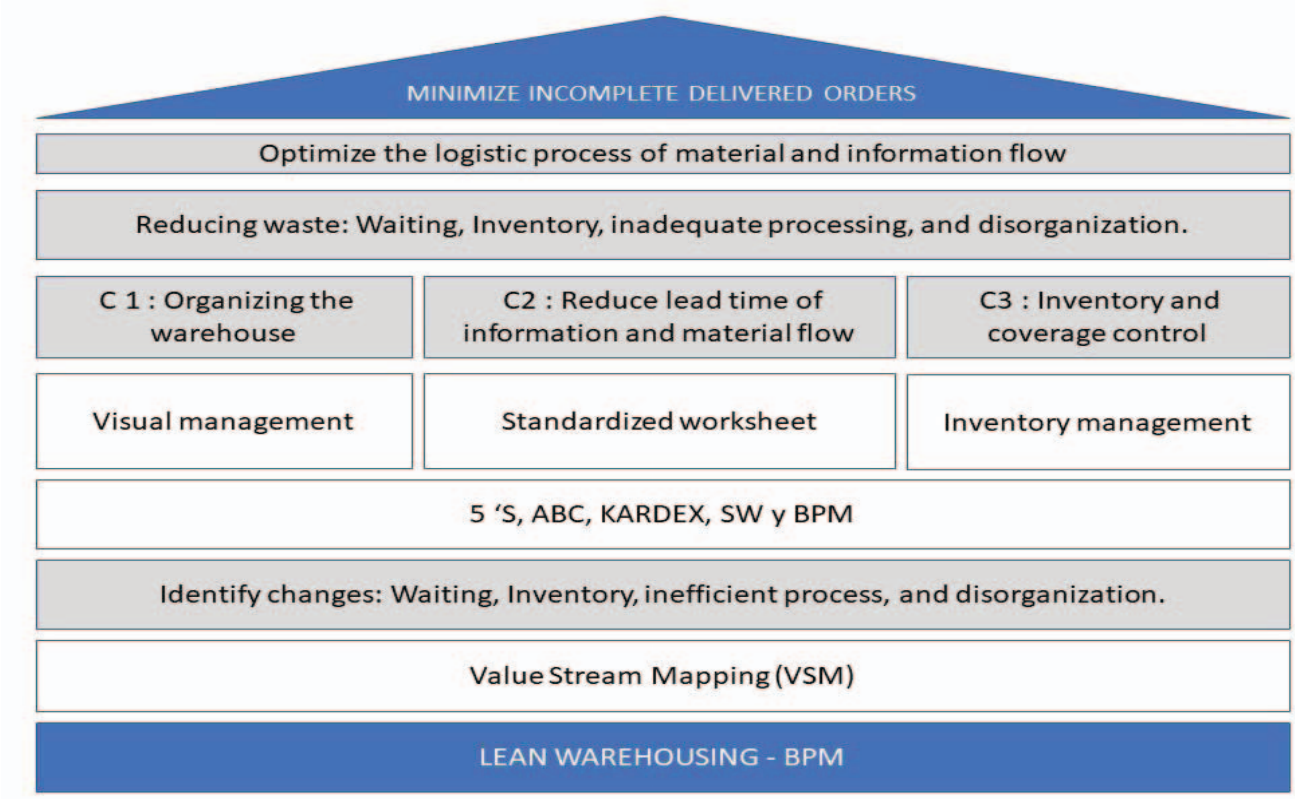


Fig. 1. Integrated Lean Warehousing – BPM model

B. Proposed model

The proposed model seeks to increase the number of complete orders delivered and improve the indicators of each cause significantly. This model was built under 2 fundamental supports; On the one hand, the preliminary diagnosis, which consists of a series of processes and tools used to better analyze the current situation of the company. Calculation and analysis of the main logistics indicators, lane diagram, VSM diagram, Pareto diagram and root cause problem tree were used. Second, this model has a technical, empirical, and experimental validation. The model is adjusted to the SMEs of the sector since a proposal is sought that does not require a high investment and that the return is the most effective possible in terms of monetary benefits for the company. Likewise, practical, functional, and previously applied tools were used for the model. The effectiveness of similar models applied in warehouses in the sector was verified to carry out the method correctly.

Another contribution of this model is that it applies tools to improve warehouse efficiency and uses BPM to integrate information between the administrative area and the warehouse. This tool reduced the delays in the information flow since the administrative part provides the information to start with the first warehouse process. Although using Lean Warehousing tools has proven successful for any industry, research is still scarce. Moreover, there is not much scientific evidence to guide the construction materials sector in general. Finally, it will be essential to corroborate the use of the Lean Warehousing methodology in this sector to contribute to and spread the optimization of warehouses. As a result, there will be a significant improvement in the company's productivity.

There are many case studies where the BPM philosophy is applied, especially in food, textile, services, and others. However, there are not many studies about its application in the material storage processes of the construction industry and similar. Reason for which it will be essential to corroborate its use in this sector in order to contribute to future research.

As has been shown, implementing process standardization to aim for standardized work is essential. Not only in the production area of the manufacturing sector but also in any company since it is a tool that improves any process. However, in most literary reviews, work standardization is applied to companies in the manufacturing sector. Finally, it is expected that the application of this tool will be helpful for mypes in the distribution sector and the like that want to apply it in the future.

C. Model components

In the following subsections, the different phases of implementation of the integrated Lean Warehousing - BPM model are detailed.

- Phase 1: *Problem analysis*

The first step is gathering information and analyzing the company's current situation using different tools. The central diagram that allows representing and reviewing the current processes is the value stream map (VSM), to analyze the processes and flows with their respective times. Furthermore,

tools such as the calculation and analysis of the leading logistics indicators were also used to empirically detail the current management of the company's supply chain. Additionally, employing the lane diagram, Pareto diagram, and root cause tree, the most relevant problems within the management of the flow of information and materials of the company were identified; with this, the improvement proposal to be implemented is built.

- Phase 2: *Intervention*

Next, the application of the tools of the proposed model to be implemented is detailed. For this, the development of these tools will be progressively specified. First, the model demands to start with the standardization of the work. The company's critical processes were analyzed using observation and flowcharting. In addition, a time study was applied to standardize the correct work, and the optimal work method for this type of process was documented by employing graphs and manuals. In addition, we sought not only to improve the operational management within the warehouse but also the management of the administrative area that participates in the information flow process provided to the logistics area. Therefore, a study of the administrative processes involved was developed through BPM. The aim was to structure and optimize these processes using a shared cloud to achieve an efficient flow of information.

Subsequently, an inventory management system was implemented using KARDEX templates for recording inventories. Subsequently, the warehouse manager was trained in its use, as well as in the preparation of weekly inventory reports. In addition, the ABC multi-criteria and 5S tools were used to improve warehouse management. For the first one, the sales reports were analyzed to classify the most relevant products. Likewise, a study of the weights of the sheets was carried out to determine the products that should have faster access. Once classified, the warehouse personnel were trained on distribution, and the shelves of the warehouses were labeled according to the corresponding order. Finally, in the case of 5S, an initial warehouse diagnosis was carried out to develop a training plan for the personnel. Also, measures to be adopted were proposed, such as the delimitation of spaces, signage of areas, use of waste containers, implementation of cleaning times, etc. In addition, a schedule of weekly audits was implemented to ensure that the new work method would be sustainable.

- Phase 3: *Verification*

In this last phase, it was evaluated and verified whether the objectives were met. This verification of the model was carried out in two ways. In the case of ABC, 5S, and Kardex, a pilot test was carried out for five months in the warehouse. On the other hand, for the case of standardized work and BPM, the feasibility was checked by employing a simulation in Arena software. Finally, the pilot test validated the improvement by measuring inventory record accuracy, location registration accuracy and Kardex indicators after the test time. In the case of the simulation, the model calculated average warehouse and administrative times. All of these were calculated to ensure the reliability of the improvement model. These results were compared with the initial values to calculate the impact of the applied model

D. Improvement model diagram

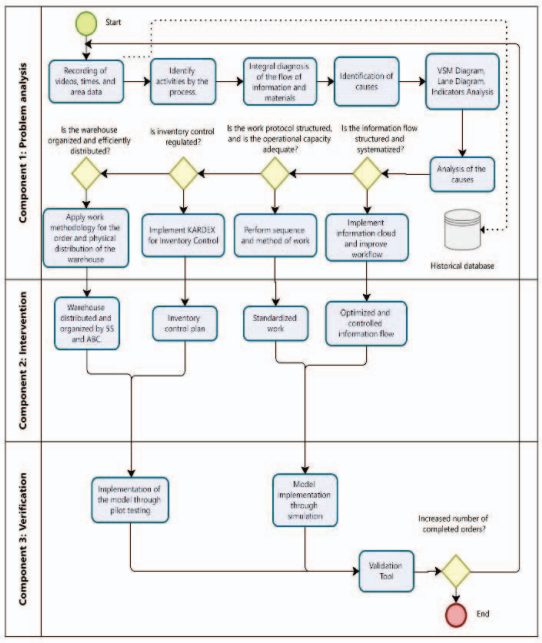


Fig. 2. Improvement model diagram

E. Indicators

To evaluate the improvements obtained after the implementation of the proposal, the following indicators were used.

Inventory Record Accuracy: Measures the accuracy of inventory records.

$$Inventory\ Record\ Accuracy = \left(\frac{Number\ of\ wrong\ counts}{Number\ of\ counts\ made}\right) \text{x } 100$$

Accuracy of location registration: Indicates the percentage of locations in which the quantity of merchandise that appears in the system coincides with the physical quantity.

$$Accuracy\ of\ location\ registration = \left(\frac{Stock\ number\ located\ correctly}{Total\ stock\ number}\right) \text{x } 100$$

Number of full orders delivered: Measures the number of orders delivered with full quantity.

$$Number\ of\ full\ orders\ delivered = \left(\frac{Number\ of\ completed\ order\ delivered}{Total\ number\ of\ orders\ delivered}\right) x\ 100$$

Coverage: It is the indicator that allows estimating the number of days that a company can supply its customers without the need to buy new stock from its supplier.

$$Coverage = \left(\frac{Total\ inventory}{Total\ sales}\right) \text{x } 100$$

Cycle time: The time in which a process executes.

$$Cycle\ time = (\frac{Sum\ of\ observed\ times}{Number\ of\ cycles\ observed})$$

Productivity: It is the degree of effective use of each element of production.

$$Productivity = (\frac{Number\ of\ orders\ delivered}{Man - Hours\ employed})$$

IV. VALIDATION

Arena software was used in this work to validate the proposed improvement model. After applying the work standardization and BPM tools, it was sought to corroborate the time reduction within the warehouse and the administrative area. Additionally, a pilot test of the KARDEX, 5S and ABC tools was carried out for five weeks to visualize the evolution of the improvement along with an economic analysis of the implementation.

A. Initial diagnostic

The company under study belongs to the construction materials distribution sector, which mainly imports and markets sheets in Peru. After a diagnosis was carried out using different tools, problems were identified, such as delays and inaccuracy in the flow of information, inefficient warehouse management, and a company coverage below 1. All this causes the indicator of complete orders to be 83%. This problem generates an economic impact on the organization of 168598 PEN lost sales due to incomplete deliveries in the last six months, representing 24.79% of sales revenue in the last six months.

According to the Pareto diagram based on the sales reports, it was found that the root causes of the problem were inefficient information flow (65.12%) and poor warehouse management (34.88%).

B. Validation of the design and comparison with the initial diagnosis

The design validation includes the simulation of the proposed model in Arena software and the improvement model. First, a representation of the complete process within the warehouse was plotted. This way, data collection and comparison between the current indicators and process objectives were started.

Within the data collection, the operating and administrative times were taken to verify the indicators. All this, in one month for the containers and dispatch of black ALUMAK sheets (the company's best-selling product).

The first tools implemented were 5S, ABC, and KARDEX. First, a measurement of the company's current indicator was carried out without any intervention. Then, after five weeks of applying these tools, another measurement of the same indicators was made to see the difference. These are inventory record accuracy, accuracy of location registration, and coverage. All of them detailed in Table I.

TABLE I. COMPARISON OF CURRENT AND EXPECTED INDICATORS

	Name of the indicator	***Current***	***Expected***	***Obtained***
1	Accuracy of location registration	79%	98%	93%
2	Inventory record accuracy	63%	98%	92%
3	Coverage	43.17%	100%	85%

C. Simulation of the proposed improvement

In the simulation, a model was built that graphs the improvement proposal to the problems observed regarding the implementation of standardized work and BPM within the warehouse and the administrative area.

Furthermore, a deep analysis of the impact of the tools was carried out in a simulation model in Arena. The modeling takes as scope from the container's arrival to the sheets' dispatch to the customer and its invoicing. The improvement for the proposal is visualized in the model shown in Figure 3.

Before starting the simulation, it began with collecting input data provided by the same entity under study. This way, a time study was carried out using industrial timekeeping, and the standard times were calculated for each of the activities within the warehouse and the administrative area. This was done in order to be able to reach a number of observations in order to have an adequate use of the software and the expected simulation. For this reason, a confidence level of 90% and a margin of error of 10% were used and accepted as statistical parameters. Subsequently, the data collected was imported into the input analysis tool, where the most appropriate statistical distribution and its parameters were obtained for each process according to the statistical adjustment. The distributions determined reached a p-value more significant than 5% in the chi-square and Kolmogorov test. The values obtained are shown in Table II.

TABLE II. FITTED DISTRIBUTION VALUES

Process	***Distribution***	***Units***
Arrival of containers	7.5 + GAMM(0.656, 2.88)	Days
Number of containers	TRIA(46,48,50)	Units
Container entry and exit	TRIA(14.5,20,25.5)	Minutes
Reception preparation	TRIA(24.5, 30, 35.5)	Minutes
Unloading of sheets	TRIA(20.5, 23, 25.5)	Seconds
Sheet inspection	UNIF(3.5, 6.5)	Seconds
Creation of the quantities and state of charge document	UNIF(14.5, 17.5)	Minutes
Shelf preparation	TRIA(14.5,21,25.5)	Minutes
Sheet storage	UNIF(18.5, 21.5)	Seconds
Truck entry and exit	TRIA(29.5, 35, 40.5)	Minutes
Prepare orders	UNIF(0.5, 3.5)	Minutes
Dispatch of the sheets	UNIF(2.5, 5.5)	Minutes
Send invoice to warehouse	TRIA(25.5, 32, 36.5)	Minutes
Photo review and invoice verification	UNIF(29.5, 32.5)	Minutes
Entry to the system	29.5 + 11 * BETA(1.28, 1.2)	Minutes
Entry to the sales system	64.5 + 11 * BETA(0.648, 0.698)	Minutes
Prepare an invoice	UNIF(84.5, 87.5)	Minutes
Sell according to database	TRIA(121,127,132)	Minutes
Invoice a costumer	24.5 + 3 * BETA(1.23, 1.26	Minutes

Process	*Distribution*	*Units*
Coordinate the departure	TRIA(10.5,16,21.5)	Minutes
Sales income	4.5 + 3 * BETA(1.2, 1.3)	Minutes
Send the invoice to the costumer	TRIA(15.5, 21, 26.5)	Minutes

For the simulation, it was statistically determined that the appropriate number of replicates was 30 to ensure the statistical validity and credibility of the data. The results obtained are detailed in Table III.

TABLE III. COMPARISON MATRIX OF THE EXPECTATIONS OF THE CURRENT SITUATION AND THE RESULTS OF THE SIMULATION

Indicator	*Current*	*Simulation*	*Units*
Total warehouse time	776.89	713.87	Minutes
Total admin time	768.8	705.87	Minutes
Productivity	0.591	0.6430	sheets/Min

A reduction in the total order time in the warehouse of 63.02 minutes was achieved. This reduction represents an 8.11% reduction concerning the current time. This improvement is mainly due to the warehouse's standardization of the work method. As a result, the operators have greater effectiveness in the processes in less time. Also, the standardization has allowed the total warehouse time not to be impacted by the incorporation of a new process within the warehouse management, which is the inventory inspection. Before implementation, the company lacked performing a periodic inspection of the current inventory stored, which also impacted the company's inventory record accuracy coverage and value. In the improved simulation model, it is proposed to add a weekly inspection process performed by the warehouse manager. For this reason, the improved productivity reaches 0.643 sheets/min, demonstrating an improvement in warehouse management.

In addition, a decrease of 62.93 minutes was achieved within the administrative area. This reduction represents an 8.19% improvement due to the improvement in business process management (BPM). By structuring and optimizing the administrative times that are key to the flow of information in the company, the waiting time for communication with the warehouse is reduced. Implementing a cloud with reports, invoices, and data allows having the information within reach and at the right time. For this reason, processes such as invoice verification and photo review were eliminated by having a system updated in real-time with synchronized data between the administrative area and the warehouse.

Finally, as mentioned above, an investment is considered for adequately implementing the proposed model, the total cost of which amounts to PEN 20447.

Within the costs to be considered for implementing the proposed model, the time of specialists in each of the tools has been considered. A fundamental part of the implementation is the support for the planning and verification of the correct execution of the expected framework. In addition, they will be responsible for ensuring the tools' medium and long-term relevance. The training hours for the operators and warehouse manager have been considered, which will be within the working day. Lastly, it is essential to acquire different supplies such as paint, paint cans, posters, and others. These will allow the organization and development of visual management within the warehouse.

In order to corroborate the feasibility and profitability of the proposed improvement, an economic analysis of the proposal was carried out. For this purpose, a COK of 25% was considered for the analysis, and a monthly return oinvestment of 28100 PEN. Table IV is what the company currently loses monthly in sales due to incomplete orders delivered. As a result, the following results were obtained:

TABLE IV. ECONOMIC EVALUATION OF THE PROPOSAL

NPV	62488 PEN	IRR	136%	PP	0.73	B/C	4.06

Therefore, the profitability of the proposed model can be evidenced since the NPV amounts to a value of 62488 PEN, and the IRR indicator is higher than the opportunity cost of 25%. Additionally, the payback period is less than one month due to the significant loss generated by incomplete orders delivered to the company.

V. CONCLUSIONS

This research shows that through the application of Lean Warehousing and BPM tools, it is feasible to optimize the leading warehouse management indicators of the company. First, the BPM tool was used to improve the accuracy of the warehouse inventory register caused by a nonexistent information flow process. As a result, the inventory record accuracy indicator improved from 79% to 95%. Second, to increase the accuracy of the recording of locations within the warehouse, the ABC multicriteria tool and 5S were used. These tools gave us a better organization, structure, and fixed methodology for the warehouse, where the accuracy of location registration indicator went from 63% to 95% improvement. Third, the current coverage was improved from 43% to 100%. This improvement was achieved by applying the Kardex tool, which allows an inventory control plan, which was nonexistent in the case of the warehouse. Finally, work standardization was used to improve the operational capacity and the nonexistent work protocol. Through this sequence within the warehouse, it was possible to reduce the cycle time from 776.89 minutes to 713.87 minutes.

One limitation of the model proposed in this case study is the capacity of the SMEs in terms of technological and monetary resources. Therefore, it is recommended to consider the support of software and instruments connected to a network to have an automated inventory report with fewer errors. In addition, this case study focused on the problem of orders delivered in total; however, another problem affecting this type of company is the difficulty of handling the construction sheets.

For this problem, a possible solution would be to study the feasibility of implementing a warehouse design that allows the installation of an industrial lifting hook.

REFERENCES

[1] Grubor, N. Milicevic and N. Djokic, "The impact of store satisfaction on consumer responses in out-of-stock situations," Revista Brasileira de Gestão de Negócios, vol. 19, pp. 520-537, 2017.

[2] T. W. Gruen, D. S. Corsten and S. Bharadwaj, "Retail Out of Stocks: A Worldwide Examination of Extent, Causes, and Consumer Responses," 2002.

[3] J. C. Ehrenthal and W. Stölzle, "An examination of the causes for retail stockouts," International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2013.

[4] T. W. Gruen, "Gruen, T.W. (2007). A Comprehensive Guide To Retail Out-of-Stock Reduction In the Fast-Moving Consumer Goods Industry A research study conducted," 2007.

[5] Perú Retail, "Perú: ¿Cómo las empresas de retail reaccionaron este año ante la inesperada pandemia?," [Online] 2020, Nov. 23. Available: https://www.peru-retail.com/peru-empresas-retail-reaccionaron-ante-pandemia/

[6] M. Rezaei, M. A. Shirazi and B. Karimi, "IoT-based framework for performance measurement: A real-time supply chain decision alignment," Industrial Management & Data Systems, vol. 117, no.4, pp. 688-712, 2017.

[7] Y. Nuñez-Castañeda, M. Moreno-Samanamud, M. Shinno-Huamani, F. Maradiegue-Tuesta and J. Alvarez-Merino, "Improvement of Warehouses of Distribution Companies through Lean Warehouse and an Allocation Algorithm," 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), 2019, pp. 473-478.

[8] J. Gu, M. Goetschalckx and L. F. McGinnis, "Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review," European Journal of Operational Research, vol. 203, no 3, pp. 539-549, 2010.

[9] S. Sharma and B. Shah, "A proposed hybrid storage assignment framework: A case study," International Journal of Productivity and Performance Management, vol. 64, pp. 870-892, July 2015.

[10] P. G. Abhishek and P. Maheshwar, "Achieving Lean Warehousing Through Value Stream Mapping," South Asian Journal of Business and Management Cases, vol. 9, no. 3, pp. 387-401, 2020.

[11] N. Buonamico, L. Muller and M. Camargo, "A new fuzzy logic-based metric to measure lean warehousing performance," Supply Chain Forum: An International Journal, vol. 18, no. 2, pp. 96-111, 2017.

[12] BPMInstitute.org, "BPM: Technology or Philosophy?," [Online], 2022.

[13] A. Agrawal, "Business Process Mapping for Enterprise Integration," Infosys Technology Ltd, 2005.

[14] W. Van Der Aalst and K. M. Van Hee, "Workflow management: models, methods, and systems," The MIT Press, 2004.

[15] J. Lee, N. Cho, M. H. Yun, and Y. Lee, "Data-Driven Design Solution of a Mismatch Problem between the Specifications of the Multi-Function Console in a Jangbogo Class Submarine and the Anthropometric Dimensions of South Koreans Users," Applied Sciences, vol. 10, no. 1, p. 415, January 2020

[16] A. Realyvásquez, F. J. Flor Moltalvo and J. Blanco, "Implementation of Production Process Standardization—A Case Study of a Publishing Company from the SMEs Sector," Processes, vol. 7, no. 10, p. 646, September 2019.

[17] S. Bragança and E. Costa, "An application of the lean production tool standard work," Jurnal Teknologi, vol. 76, no. 1, pp. 47-53, 2015.

[18] E. Flores and D. C. Whybark, "Implementing multiple criteria ABC analysis," Journal of Operations Management, vol. 7, no. 1-2, pp. 79.85, 1987.

[19] Guzel and A. S. Asiabi, "Improvement Setup Time by Using SMED and 5S an Application in SME," International Journal of Scientific and Technology Research, vol. 9, no 1, p. 3727-3732, January 2020.

[20] J. Gu, M. Goetschalckx and L. F. McGinnis, "Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. European journal of operational research," European journal of operational research, vol. 203, no. 3, pp. 539-549, 2010.

[21] S. Sharma and B. Shah, "A proposed hybrid storage assignment framework: a case study," International Journal of Productivity and Performance Management, vol. 64, no. 6, pp. 870-892, 2015.

[22] J. C. Quiroz-Flores, D. S. Canales-Huaman and K. G. Gamio-Valdivia, "Integrated Lean Logistics - Warehousing model to reduce Lead Time in an SME of food sector: A research in Peru," in 2022 The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (IEIM 2022), pp. 182-188, January 2022.

[23] D. Silva-Campusano, D. Vega-Romero, A. Flores-Perez, J. C. Quiroz-Flores and M. Collao-Diaz, "Improvement Proposal Applying Standardized Work and 5'S to reduce the rate of returned orders of a Poultry company under the PDCA Cycle," in 7th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, June 2022.

[24] A. A. Márquez-Ordinola, J. A. Vásquez-Solis-Echegaray, J.C. Quiroz-Flores, A. E. Flores-Pérez and M. F. Collao-Díaz, "Integrated Lean-BPM Model to Increase Order Fulfillment In MYPES in The Textile Sector," [Unpublished], 2022.

[25] B. Baby, N. Prasanth and D. S. Jebadurai, "Implementation of lean principles to improve the operations of a sales warehouse in the manufacturing industry," International Journal of Technology, vol. 9, no. 1, p. 46, 2018.

[26] H. L. Lin and Y. Y. Ma, "A New Method of Storage Management Based on ABC Classification: A Case Study in Chinese Supermarkets' Distribution Center," SAGE Open, vol. 11, no.1, April 2021

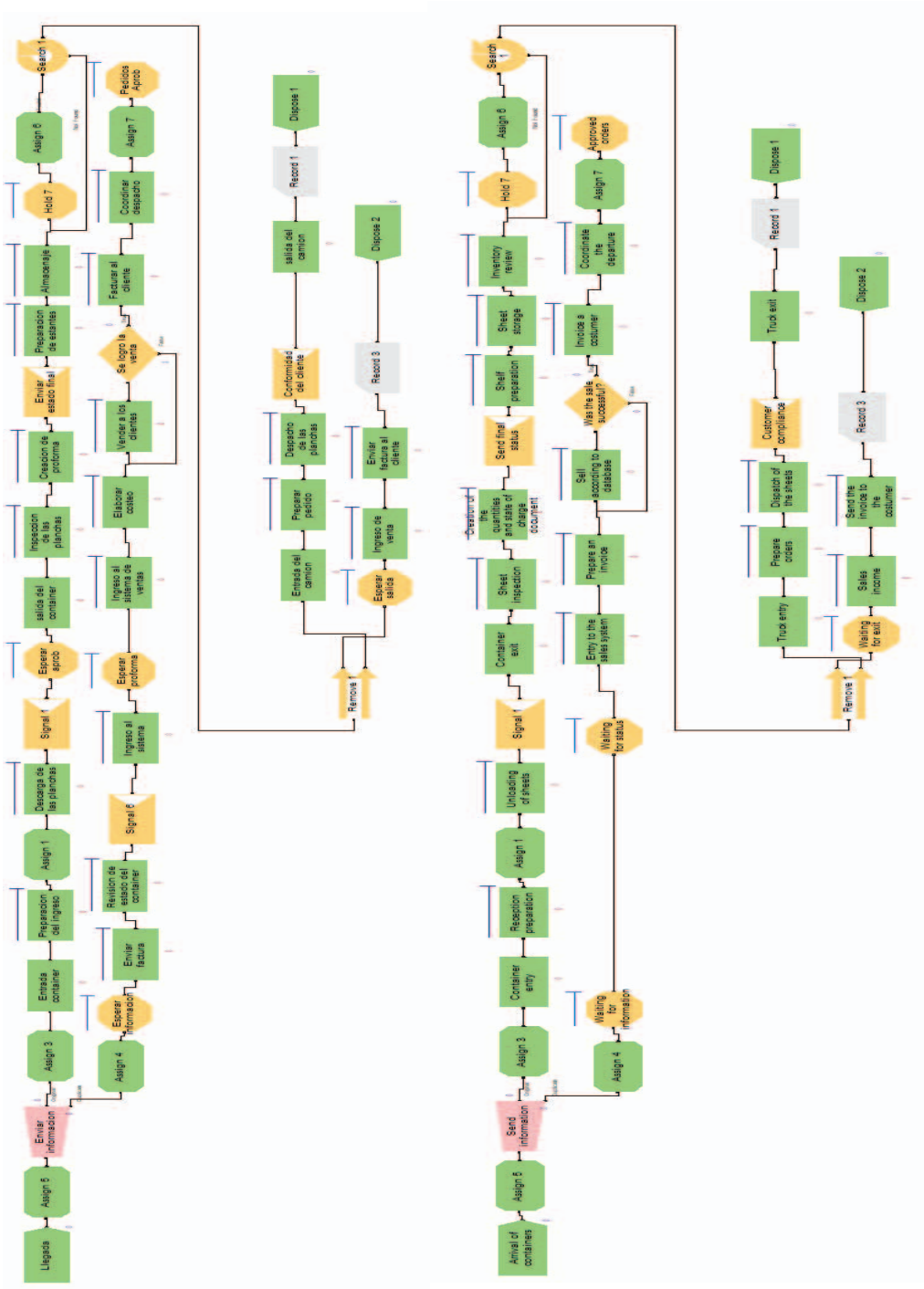


Fig. 3. Original simulation model of the process between the warehouse and the SCM administrative area.

Fig. 4. Improvement simulation model

Increased inventory turnover through a Lean Warehousing management model in SMEs suppliers to the food industry

Sharon Cynthia Espino-Sanchez
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
20170517@aloe.ulima.edu.pe

Andrea Ximena Vasquez -Ortiz
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
20171639@aloe.ulima.edu.pe

Juan Carlos Quiroz-Flores
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
jcquiroz@ulima.edu.pe

Abstract- This research article is developed in an importing and marketing company belonging to the food industry in Peru. It is known that warehousing is one of the main costs incurred by a company in this industry; therefore, in this study a set of engineering tools were defined with the objective of reducing the technical gap of warehouse indicators compared to the industry through the optimization of processes in this area. The improvement proposal arose from the implementation of a warehouse management model, which included the implementation of tools such as Kanban, 5S and supplier homologation. The proposed model made it possible to streamline processes in the warehouse, which resulted in a better stock turnover rate and, therefore, in storage efficiency. The data analysis for improvement was performed using Arena Simulation software, through which the favorable results in each of the evaluated indicators were revealed. Inventory turnover increased 8 times with respect to the initial level, matching the industry average turnover of 12 times per year. On the other hand, the level of inventory count accuracy increased to 97.44%, which had a positive impact on the performance of the sales area due to the accuracy in the amount of inventory available for sale. Finally, the choice of suppliers was improved, as evidenced by a 4.64% reduction in inventory loss.

Keywords– Warehouse management model, lean warehousing, kanban, 5S, certified supplier, inventory turnover, storage efficiency.

I. INTRODUCTION

Currently, the trade sector has a 10.2% share of the Gross Domestic Product (GDP) of Peru, representing one of the main engines of the Peruvian economy. In June 2021 alone, the commerce sector expanded by 38.06% compared to the same month of the previous year, mainly due to wholesale and retail trade [1]. At this point, it is highlighted that one of the factors of this growth was due to the food industry due to the growing demand for basic necessities in the state of emergency. Food spending growth is projected at 7.2% y-o-y in 2022 from 3.0% y-o-y in 2021 [2]. However, as of June 2020, Indecopi reported 6,012 consumer complaints about the delivery times of their purchases, which shows a lack of response capacity on the part of the sector in its outbound logistics and, therefore, in its distribution of orders [3]

The problem identified represents an increase in costs, in addition to an inefficiency in its logistics chain [4]. This may be due to low productivity in warehouse management, low inventory turnover or the lack of existing procedures on how to proceed with the issue of goods, or consequently poor follow-up management. of orders [5] This type of The problem is common in medium-sized companies that do not invest in outbound logistics, which involves cargo consolidation and bag shipping. These risks in the supply chain must be resolved based on methodologies and control tools, especially in service companies [6].

In this sense, it is necessary for the trading company under study to optimize those processes that have an impact on its outbound logistics, such as warehouse deficiencies, so that this does not have an impact on its profits [4]. Therefore, research has been conducted on the applicability of tools such as 5S, Kanban and supplier approval in the sector to generate a storage management model of the company to improve the existing processes in the warehouse area and thus improve the company's performance. [7] [8]

In order to present the proposal, this academic article has been divided into the following sections: State of the Art, where background for the problem will be presented from approaches of different authors; Contribution where the theoretical foundation of the model is explained and the proposed model is described with its respective indicators; Validation where the results before the intervention, the implementation of pilots and simulation, and the results after the intervention and Conclusions are described.

II. LITERATURE REVIEW

A. Lean Warehousing in the trading and importing sector

One of the problems of importing and trading companies is the low rotation of the product, because it represents immobilized money in the warehouse and ends up increasing costs, generating inefficiency in the management of the logistics area [4]. Many times, even when the product or input is not of high turnover, companies make it necessary to purchase it for various reasons, either because a specific customer has requested it, or the purchase is necessary because it is part of the purchase package [9], which leads to deducting the existence of logistics waste in warehouse management [10].

Given this, the need arises to improve purchasing management and demand forecasting, so that a company can acquire what is necessary and according to the level of rotation of each product [11]. For this reason, a management model based on the Lean Warehousing methodology is the most appropriate, since it brings together a set of tools and manages a system organized according to the needs of the companies. In this way, a model based on this methodology

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00013

will emphasize the reduction of excesses to improve the operation of a company's warehouse. [12] [13] [14]

B. Kanban in the trading and importing sector

A characteristic problem of inventories is the difference between the physical units and those recorded in the system used by a company [7], which is more critical in trading companies [15]. In addition, the more items a warehouse handles, the greater the risk and therefore the greater the control [16]. This difference leads to a lack of real information on inventory turnover, so companies must have a reliable control system for better inventory management and, therefore, of the logistics chain [17] [18] [19]

In this sense, a system is required that allows greater control of the items entering and leaving the warehouse, one of the most useful being Kanban cards [10]. The information contained in the cards should match the quantities in the physical warehouse with the record in the system [20]. This way of working will be more efficient depending on the training of the warehouse personnel and the commitment of the management to control the inventory program [21] [22] [23]

C. 5'S in the trading and importing sector

The lack of order is a common problem in companies to a lesser or greater degree, generally given by the absence or little strength that companies promote in improving the organizational culture, because it is not seen as a priority or important [8], however, there is a need to minimize process times, minimize errors and avoid waste [21].

In this sense, the 5S is considered as a culture of order, minimizing waste and better utilization of resources [18], which even minimizes work stress, which is why the staff often make omissions and errors when performing their work [23], which is why this technique is widely used in warehouses, where a large number of items are handled and products, materials and supplies that must retain their initial state as intact as possible and must have a defined space where they are stored must be moved. [19] [17] [24]

D. Standardization of processes in the trading and importing sector

Today's companies face constant personnel turnover due to various factors, monotony of the work, disagreement of remuneration, better opportunities, among others, which causes a task to be assigned to different people at different times, which would not be bad if companies sought to work in a standardized way [25]. There is a common mistake that companies make and that is that the simplest operations to carry out have little importance of control and improvement, being precisely in these operations or processes where problems arise due to lack of technicality, even more so when staff turnover is higher. [14]

In this way, the lack of standardization implies errors, delays, oversights, duplication of work, which have repercussions on management, in this case on inventory management, an area that, except for the boss, the rest of the staff is operational, with little or no technical preparation [7]; hence the importance of standardizing processes in the warehouse, especially when in this area information and items are handled that represent money for a company for the same products and therefore the handling of these products allows greater rotation and income, profits for a business. [16] [8] [12]

III. CONTRIBUTION

A. Model basis

The basis of the proposed model is the Lean Warehousing methodology, which encompasses a set of tools to reduce excesses, and thus achieve a better functioning of the warehouse in a company that markets and imports ingredients for the food industry. The proposed model presents the tools that will be useful in the solution of a low inventory turnover, such as Kanban and standardization, 5S and supplier approval.

B. Proposed model

For the present model, articles based on Lean Warehousing were considered, which explain the aforementioned tools, but do not present an application of them in companies supplying the food industry; that is, the application is still scarce for this industry. Likewise, although the articles chosen provide reliable and accurate information on these tools, they do not have defined warehouse management models for the sector to which they are addressed. For these reasons, the contribution of this study lies in the design of a structured warehouse management model for companies in the sector, as well as in the implementation of this model to demonstrate the usefulness of the methodology and its tools, results that are measured through indicators and compared with the sector average.

Firstly, a diagnosis of the company was made through the problem tree, the Pareto diagram, the process diagram and indicators, which were used to identify the necessary tools. Next, the 5'S tool was implemented to establish an adequate flow of the storage process, mitigating disorder and disorganization.

Secondly, the Kanban tool was implemented, through the use of cards containing information on the quantities in the physical warehouse, which coincided with the record in the system. This is one of the most useful systems for the control of incoming and outgoing goods, in addition to the 5S tool whose implementation allows an organized treatment of both products and their information [21].

Finally, through the process of supplier homologation, it was sought to determine an adequate purchase of orders in order to have an inventory volume according to the correct projection of the demand. This homologation is necessary in this type of company because it is the only way to evidence compliance with quality standards and allows the company to supply itself with standardized products, which positively influences the efficiency of the product commercialization process.

For the development of the proposed model, 3 components were considered, as shown in the figure. The main input is the main problem of low inventory turnover. This input is the basis of the diagnosis (component 1), which aims to obtain a complete analysis of the reasons and root causes of the problem, taking into account the current situation of the company. Then, the ideal tools are chosen according to the causes (component 2) to be implemented (component 3) with a simulation or a pilot, as the case may be. Finally, thanks to the applicability of the proposed model, the output is the improvements made.

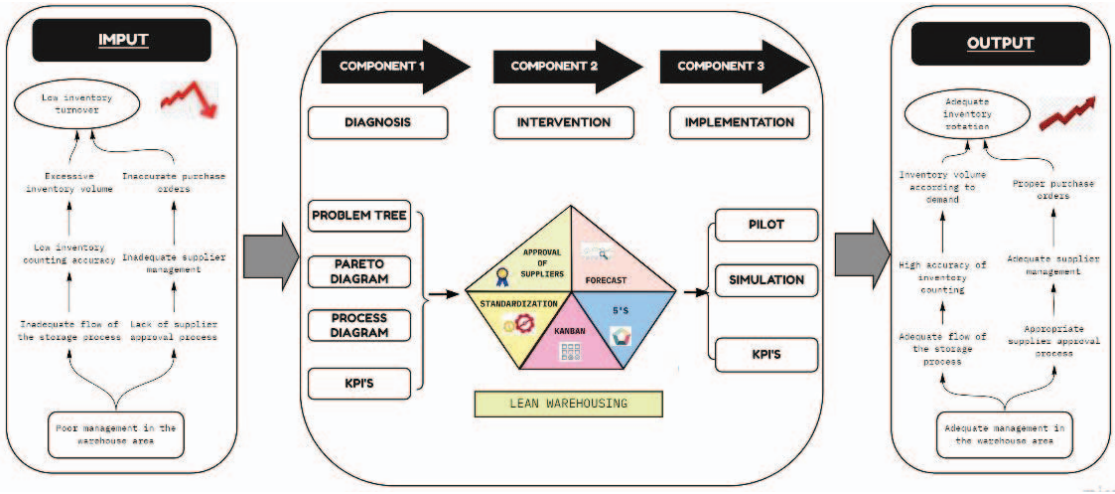


Fig.1. Components of the chosen sources

C. *Components of the model*

The model is divided into 3 components as mentioned below:

a) Component 1: Identification of the improvement opportunity

This stage consists of analyzing the root causes of the main problem. In this way, each of them can be solved with the identification of tools to help in the next phase.

b) Component 2: Intervention

- 5'S
  Step 1: Seiri - Classify
  Products were sorted upon arrival at the warehouse, eliminating damaged products that do not meet the technical specifications given by the company.
  Step 2: Seiton - Sort
  An appropriate position was assigned to each product that has not been detected as defective.
  Step 3: Seiso - Clean
  Continuous cleaning of the warehouse was carried out and controlled by means of check sheets.
  Step 4: Seiketsu - Standardize
  The processes described in the previous points were standardized through instructions, guides and manuals.
  Step 5: Shitsuke – Discipline
  To implement this tool, labor discipline was needed at every step and also to achieve sustainability of the improvements.

- Kanban and process standardization

  Before implementing this tool, the process flow was identified through the Value Stream Mapping technique, which allowed analyzing all the process components under the same indicators, so that the decision taken to identify the critical process or processes was the correct one. In this sense, it is necessary to identify the quantity of products entering and leaving the warehouse in order to calculate the quantity needed on the Kanban cards. It is also essential to make a good demand forecast in order to identify the quantities needed.

  It was necessary to use this tool to store the critical characteristics of each product. This tool allowed the standardization of the incoming goods identification process, since each card allowed obtaining accurate information for each salesperson. In the same way, this information was used to fill the kardex implemented in the company.

- Supplier certification and approval

  In this homologation process, the supplier's operational capacity, financial and legal compliance, as well as the management systems they employ, are evaluated.

  A criteria and attribute matching methodology was established to identify whether the suppliers will be able to supply products in a standardized manner according to the client's needs.

c) Component 3: Implementation

In this phase, the implementation will be evaluated and the proposed indicators will be measured to validate compliance with the objectives and ensure the development of the improved model.

D. *Flow of the proposed model*

The first component collects historical information from the company, which is then analyzed through a problem tree, allowing a Pareto diagram to visualize the main sub-causes in a quantified and prioritized manner. Next, the company's process flow was diagrammed to map the causes and identify methodologies and tools based on indicators.

Thanks to the information gathered from the company and the analyses made afterwards, 3 main causes were identified.

- inadequate inventory control and record keeping
- disorder and disorganization in the warehousing process
- lack of a supplier approval process.

Therefore, in the second component, the possible tools to be implemented to solve each cause were identified, it was proposed to use the Kanban methodology, 5S and to implement the supplier approval process.

Finally, in order to implement these tools, two simulations were carried out, which show the current situation of the company and the improved situation when implementing the tools.

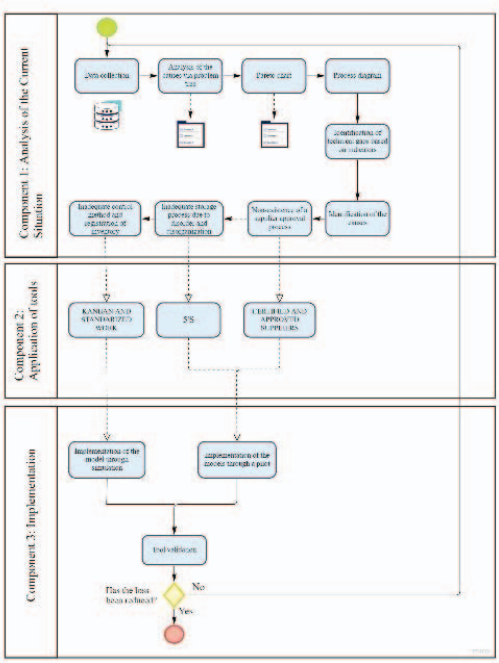


Fig. 2. Proposed Process

E. Indicators

- Inventory turnover: Expresses the number of times inventory is renewed during a one-year period.

$$Inventory\ turnover\ (times) = \frac{sales\ cost}{average\ inventory} \quad [1]$$

- Inventory count accuracy: Measures the accuracy of physical inventory compared to the book inventory; that is, how likely it is to find the book quantity in the physical warehouse.

$$Accuracy\ (\%) = \frac{theoretical\ units\ stored}{physical\ units\ stored}\ x\ 100\% \quad [2]$$

- Excess inventory as a percentage of total inventory: This ratio measures the value of obsolete inventory in relation to the value of total inventory.

$$Inventory\ shrinkage\ (\%) = \frac{value\ of\ deterioration}{total\ value\ of\ all\ inventory} \quad [3]$$

- Days of finished goods inventory on hand: Measures the number of days of finished goods inventory on hand, i.e., the volume of finished goods inventory needed to support the business.

$$Inventory\ on\ hand\ (days) = \frac{average\ daily\ balance\ of\ inventory}{average\ rate\ of\ sales\ (past\ 3\ months)} \quad [4]$$

IV. VALIDATION

For the validation of this research, the Arena software was used, which allows the implementation of the proposed inventory management model. Therefore, the first step was the diagnosis of the company to identify the possible problems in the warehouse management, and the points to improve. Likewise, the design of the validation is presented, and how the simulation was developed, explaining the inputs and outputs of the process, as well as the improvements through indicators of the company, compared with the sector.

A. Initial diagnosis

In the initial diagnosis, it was found that the main problem in the company was the low inventory turnover, which was 4 times a year, meaning that the inventory rotated every 3 months. The economic impact of this was 638 thousand soles per year in inventory costs, which meant 13% of the net profit.

Additionally, the physical volume of inventory was disorderly and disorganized in the warehouse. This had a direct impact on the amount of sales made by the sales executives because the quantity did not match what was entered in the system.

B. Validation design

The proposed model will be validated to quantify and evidence the improvements using the Arena software, which will imitate the behavior of the current situation of the company, that is to say, it will simulate the warehouse process, comparing the current process and the process after having implemented the improvement through the proposed tools. The simulation will show the optimal sample size with the help of the entities and resources necessary for the implementation of the process, scope of the system, as well as variables and attributes.

C. Simulation

To represent the current situation of the company's process flow and the proposed improvement, two process simulations were performed with Arena Software.

The data used as part of this simulation were collected as historical data of the company, such as number of orders, number of products from suppliers, storage times, waiting times and others included in the model. Likewise, by means of statistical calculations, the sample was found to determine the data distribution. In addition, to complete the model it was necessary to establish the best distributions using the Input Analyzer extension of the software used.

TABLE I. DISTRIBUTION OF TIMES BY PROCESS

Activity	Distribution	Units
Supplier deliveries	CONSTANT (90)	Days
Incoming orders	UNIF (1,2)	Hours
Warehouse reception	UNIF (1,2)	Hours
Quality control	UNIF (1,2)	Minutes
Dispatch	NORM (Mean:2, StdDev:0.2)	Hours
Awaiting credit approval	UNIF (10,15)	Days
Billing-credit	NORM (Mean:20, StdDev:10)	Minutes

The scope of the process starts from the arrival of the products delivered by the supplier. The company has a make to stock strategy, therefore, once the product is in the warehouse, customer orders are accepted, passing through several activities, ending with the dispatch of the order. “Fig. 3”, shows the current process system and “Fig. 4”, shows the improved system.

TABLE II. ENTITIES IN THE SIMULATION

Entities	Attributes	Resources	Activities
Product arrvial (suppliers)		Warehouse operator	Reception
			Quality control
			Storage
Incoming orders	Order code	Secretary	Billing
	Specification guide	Warehouse operator	Dispatch
		Salesman	Awaiting credit approval

For the analysis of indicators, the model was run for 1 month, taking into account a working schedule of 6 hours per day. The following improvements were obtained.

TABLE III. COMPARISON MATRIX

Indicator	To be	As is	Improved value
Inventory turnover	12	4	+ 8
Inventory count accuracy	>=99.3% y 99.9%	96.30 %	+ 1.14 %
Inventory shrinkage as a percent of total inventory	>=0.43% y <7.4%	7.20%	- 4.64%
Days of finished goods inventory on hand	>=14 y <30	90	- 60

The rotation was 4 times, i.e. it rotated every 3 months in the year, due to the improvement now the products rotate 12 times per year or every month, since an accurate simple demand forecast was implemented. In addition, there has been an improvement of 1.14% in inventory counting accuracy, which means an accuracy of 96.30%, this was obtained by standardizing inventory counting through an ERP system, which avoids human error and allows a better count of available products and, therefore, their sale. Finally, we were able to improve the inventory surplus by 4.64%, since, with less turnover, there are fewer unsold products in the warehouse.

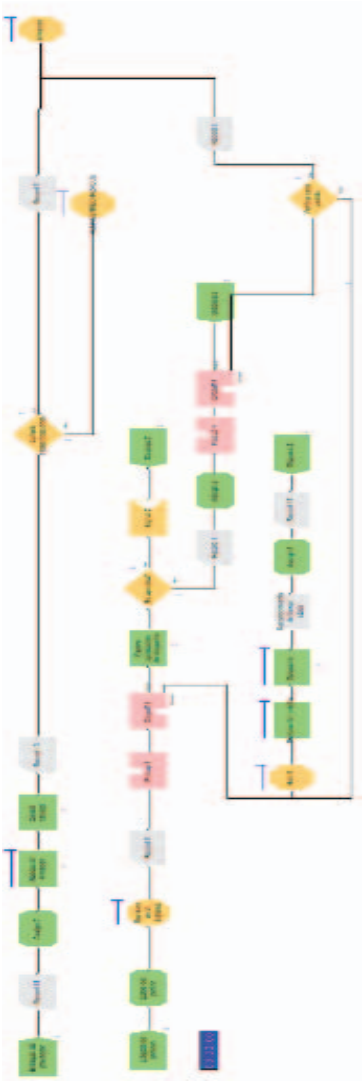


Fig. 3. Simulation in Arena current situation

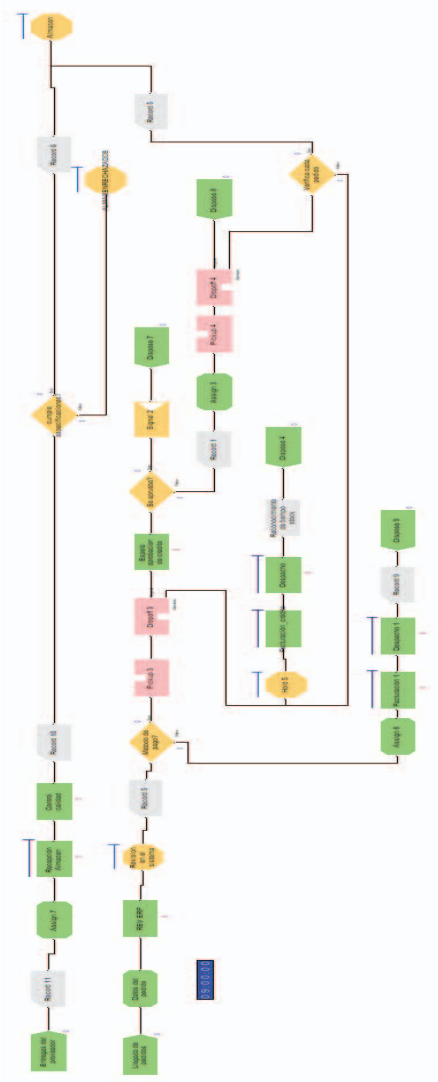


Fig.4. Simulation in Arena improved situation

V. CONCLUSIONS

The implementation of the inventory management model under the Lean Warehousing methodology approach and the tools discussed obtained positive results that, for the most part, met the expectations set forth. Inventory turnover increased from 4 to 12 times per year, equaling that of the Peruvian sector, which allowed the inventory to return to the company more frequently and, in turn, to have sufficient inventory available on a monthly basis. On the other hand, the level of accuracy in the inventory count was increased to 97.44%, which positively impacted sales due to the accuracy in the amount of inventory available in the system compared to the physical inventory. Finally, the choice of suppliers was improved, as evidenced by a 4.64% reduction in inventory loss, which was possible thanks to a supplier homologation that not only ensured the quality of the products, but also made it easier for the company to purchase the exact quantity needed in accordance with the demand forecast.

The tools that were simulated were Kanban and standardization together with the demand forecast values in the Arena Simulation program based on attributes, entities and factors. However, as for the 5S tool, an implementation was carried out with the area's collaborators, while the standardization of suppliers was seen directly with those in charge of negotiating with them, making an evaluation of each one of them. It should be noted that the order in which the tools were implemented was key to the success of the indicators obtained, which are similar to the results of the competition in the Peruvian sector, thus reducing the large initial technical gap of the company. Therefore, it can be concluded from the following case study that the results were favorable and met expectations.

REFERENCES

[1] INEI. "Sector comercio creció 38,06% en el mes de junio de 2021". Available: https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/sector-comercio-crecio-3806-en-el-mes-de-junio-de-2021-13072/.

[2] Anonymous Peru food & drink report - 2022. Fitch Solutions Group Limited. London. 2022. Available: http://fresno.ulima.edu.pe/ss_bd00102.nsf/RecursoReferido?OpenForm&id=PROQUEST-41716&url=https://www.proquest.com/reports/peru-food-amp-drink-report-2022/docview/2583644337/se-2.

[3] Saga Falabella, Ripley y Sodimac, empresas más reportadas por compras online en cuaratena, 2020. https://www.indecopi.gob.pe/-/saga-falabella-ripley-y-sodimac-empresas-mas-reportadas-por-compras-online-durante-cuarentena.

[4] D. Adams, J. Denovan, and C. Topple, "Achieving sustainability in food manufacturing operations and their Achieving sustainability in food manufacturing operations and their", Sustainable Production and Consumption, vol 28, pp. 1491-1499, 2021.

[5] J. Zapata, A. Vélez, and M. Arango, "Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte. Investigación administrativa", Científica, vol 49(126), 2020.

[6] R. Andersson, and Y. Pardillo-Baez, "The six sigma framework improves the awareness and management of supply-chain risk", TQM Journal, 2020.

[7] S. Teerasoponpong, and A. Sopadang, "Decision support system for adaptive sourcing and inventory management in small- and medium-sized enterprises", Robotics and computer integrated manufacturing, vol. 73 (22), 2022.

[8] S. Kumar, A. Dhingra, and B. Singh, "Lean-Kaizen implementation A roadmap for identifying continuous improvement opportunities in Indian small and medium sized enterprise", Journal of Engineering, Desig nand Technology, vol. 16(1), pp. 143-160, 2017.

[9] Z. Li, and Z. Jiangtao, "Inventory management for one warehouse multi-retailer systems with carbon emission costs", Computers & Industrial Engineering, vol 130, pp. 565-574, 2019.

[10] S. Takeda, G. Tortorella, and E. Morosini, "Simulation-based analysis of inventory strategies in lean supply chains", IFAC-PapersOnLine, vol 51(11), pp. 1453-1458, 2018.

[11] A. Gobbo, F. Forno, and N. Magnani, "Making "good food" more practicable? The reconfiguration of alternative food provisioning in the online world", Sustainable Production and Consumption, vol 29, pp. 862-871, 2021.

[12] X. Chen, and T. Voigt, "Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry", Journal of Food Engineering, vol 278, 2020.

[13] H. Katayama, "Legend and Future Horizon of Lean Concept and Technology", Procedia Manufacturing, vol. 11, pp. 1093-1101, 2017.

[14] L. Cristian, and T. Celso, "Lean warehouse model to improve the level of service in a distribution center of a commercializing company in the beverage industry", in press.

[15] M. Forkan, M. M. Rizvi, and M. A. M. Chowdhury, "Multiobjective reverse logistics model for inventory management with environmental impacts: An application in industry", Intelligent Systems with Applications, vol 14 (13), 2022.

[16] R. Martins, M. Pereira, L. Ferreira, J. Sá, and F. Silva, "Warehouse operations logistics improvement in a cork stopper factory", Procedia Manufacturing, vol. 51, pp. 1723-1729., 2020.

[17] T. Pombal, L. Pinto, J. Sá, M. Pereira, and F. Silva, "Implementation of Lean Methodologies in the Management of Consumable Materials in the Maintenance Workshops of an Industrial Company", Procedia Manufacturing, vol. 38, pp. 975-982, 2020.

[18] L. Sebastian and T.Sofia, "Application of lean tools to reduce waste in an organic mango exporting company: an investigation in Peru", in press.

[19] R. Pena, L. Ferreira, F.Silva, J. Sá, N. Fernandes, and T. Pereira, "Lean manufacturing applied to a wiring production process", Procedia Manufacturing, vol 51, pp. 1387-1394, 2020.

[20] X. Tian, and H. Wang, "Impact of IT Capability on Inventory Management: An Empirical Study", Procedia Computer Science, vol 199, pp. 142-148, 2022.

[21] R. Sadeghi, m. Bagherzadeh, and M. Pasban, "A systematic literature review on supply chain approaches", Journal of Modelling in Management, vol 44, 2021.

[22] S. Shah, and E. Naghi, "Lean production and supply chain innovation in baked foods supplier to improve performance", British Food Journal, vol. 119(11), pp. 2421-2447, 2017.

[23] H. Steur, J. Wesana, D. Manoj, D. Pearce, and G. Xavier, "Applying Value Stream Mapping to reduce food losses and wastes in supply chains: A systematic review", Waste Management, vol. 58, pp. 359-368, 2016.

[24] P. Darisa, and L. Gonzalo, "Safety management model based on the standardization of processes and 5S to reduce the rate of intoxication in SMEs in the chemical sector", in press.

[25] F. Jie, and D. Gengatharen, "Australian food retail supply chain analysis", Business Process Management Journal, vol. 17, 2017.

Business management model to reduce the sales cycle in software development SMBs using BPM, CRM, and SCRUM

Valeria Tellez-Risco
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Peru
20171531@aloe.ulima.edu.pe

Juan Jose Vela-Linares
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Peru
20174014@aloe.ulima.edu.pe

Juan Carlos Quiroz-Flores
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Peru
jcquiroz@ulima.edu.pe

Alberto Flores-Perez
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Peru
alflores@ulima.edu.pe

***Abstract*—Currently, software companies in the market need an established brand value that grows over the years through continuous improvement, so it is important to build an efficient service that distinguishes the organization allowing the creation of a relationship relevant to each client. The objective of the authors is to increase the net income of the company mentioned in the work by reducing the sales cycle of the company in question, based on the use of engineering tools such as Business Process Management, SCRUM, and Customer Relationship Management to reduce the technical gap that means an annual loss of more than $72,542.82 for the company. After applying the mentioned tools and the respective simulation, a 28.84% reduction in the sales cycle was seen, which means that the previously calculated gap no longer exists, and the annual monetary loss would be eliminated.**

Keywords— Business, BPM, CRM, Scrum, Software, Sales Cycle

***Resumen*—Actualmente las empresas de software en el mercado necesitan un valor de marca establecido que crezca conforme pasan los años a través de la mejora continua, por lo que es importante la construcción de un servicio eficiente que distinga a la organización que permita la creación de una relación relevante con cada cliente. El objetivo de los autores es el aumento de la utilidad neta de la empresa mencionada en el trabajo mediante la reducción del ciclo de ventas de la empresa en mención en base al uso de las herramientas de ingeniería, Business Process Management, SCRUM y Customer Relationship Management, para poder disminuir la brecha técnica que significa una pérdida anual de más de $72 542.82 para la empresa. Luego de la aplicación de las herramientas mencionadas y la respectiva simulación, se pudo ver una reducción del ciclo de ventas en un 28.84%, lo cual significa que la brecha previamente calculada ya no existe y se estaría eliminando la pérdida monetaria anual.**

Palabras clave— BPM, CRM, Scrum, Software, Ciclo de ventas

I. INTRODUCTION

The software industry has a very high development potential worldwide because the population is increasingly digitized [1]. The development of technology applied in fieldwork streamlines a company's decision-making, operations, and processes. Therefore, it supports the growth of companies in this sector, and these companies, in turn, support the development of companies belonging to any other type of industry. In Peru alone, the software industry contributes to the economy, directly impacting the increase in GDP by approximately 450 million dollars [2]. Similarly, the growth estimate for this sector in this South American country is at an annual rate of 8.5% due to strong demand from companies engaged in the development of other activities. However, Peru could have higher growth in this industry if it were not for the cyber insecurity and the inequalities in the use of the internet that currently exist in the country [3]. This is how, for this research work, a software company whose sales process is high and, therefore, inefficient was chosen. This process generates losses of thousands of dollars that impact the company's annual billing by approximately 5.32%. If the problem is resolved, the company could serve more customers and increase its profit at the end of the year. To solve the described problem, the study highlights the importance of the creation and development of technological tools in the indicated sector, as well as mentions proposals aimed at reducing the sales cycle of a company based on devices such as Business Process Management, Customer Relationship Management, and SCRUM. Selected models based on successful cases were found in the reviewed literature to optimize the sales process and thus increase the net profit of companies in this type of industry. This scientific article is divided into six parts: Introduction, State of the Art, Contribution, Validation, Results, and Conclusions.

II. STATE OF THE ART

The purpose of this study is to analyze the sales cycle of an international software company and determine which are the causes of delay that lengthen the service time to attack the low performance; to identify them, engineering tools such as a tree of causes and objectives, as well as a Pareto and Ishikawa diagram were used. It is a fact that the absence of a system based on a continuous improvement methodology leads to this problem; therefore, to achieve the objective of reducing it with the tools mentioned above, previous studies were investigated to learn about the improvements applied to the problem to be solved. Among the articles reviewed previously, several were found in which applying BPM, SCRUM, and CRM were able to influence the sales cycle time in software companies. Some of the essential results to highlight are the following:

A. Tools to reduce the sales cycle

Regarding the tools used to reduce the sales cycle, there are multiple previous studies. Regarding BPM in the reduction of the sales cycle, it is mentioned that the implementation of this tool can help to standardize different processes of the sales cycle and therefore achieve different KPIs [4].

Concerning the use of CRM as a tool to streamline the sales cycle, it is known that it supports companies in everything related to improving customer satisfaction, which, in the future, could imply reducing the sales cycle due to the perceived trust and value of the company [5].

Similarly, The SCRUM tool is characterized by its agility and ease of use for the development and improvement of services in today's companies. Such improvements can be

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00014

performed as often as desired to solve complex adaptive problems in a productive and creative way [6].

components: problem analysis, implementation, and validation shown in Figure 1.

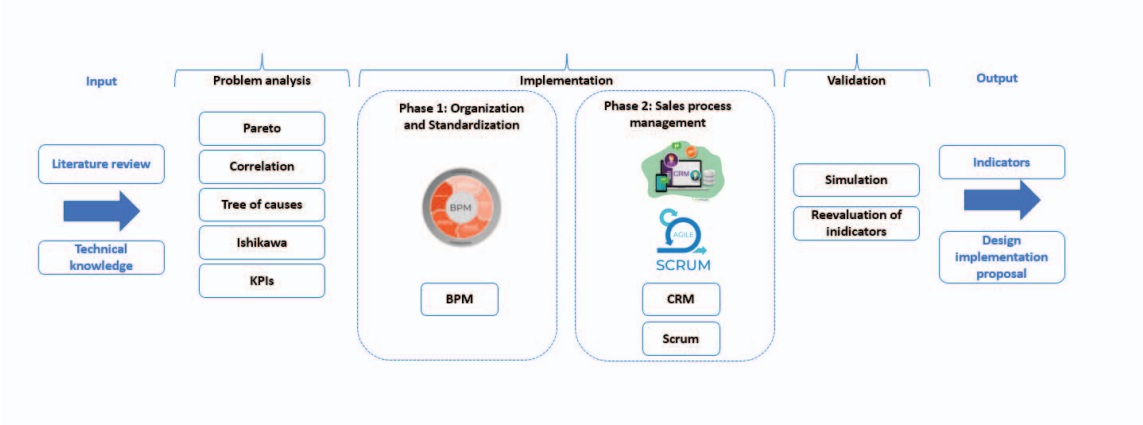


Fig 1. Proposed model for sales cycle reduction.

B. *CRM in software companies*

This tool allows automating different actions and data capture to make the company's interaction with the customer faster and more automated. In the case of software companies, the tool was applied to improve the level of customer service and increase the perceived value of the company [7] - [9].

C. *BPM in software companies*

BPM helps with the order, standardization, and automation of administrative processes within companies. In specific cases of software companies, it has been used to reduce time and administrative workloads by automating processes that were analyzed with BPM [10] - [13].

D. *Scrum in software companies*

The Scrum tool is well known in the software industry because it was precisely created by developers to improve efficiency in delivering value to the customer. Although this methodology has evolved over the years and has merged with different tools to become what it is now, it still has the same objective. Today, most companies in the software industry use Scrum to ensure quality deliverables and keep customer satisfaction high [14] [15].

III. CONTRIBUTION

A. *Model Basis*

The innovation of our proposal lies in the integration of the tools developed in the state of the art, that when integrated into the stages of the sales process of the company, will allow the increased productivity of this one.

There are several tools to implement an improvement in a sales cycle. However, the standardization of processes through the BPM improved customer interaction through CRM, and a continuous increase in efficiency through SCRUM was highlighted.

B. *Proposed Model*

Based on the literature review of 40 scientific articles, the proposal consists of an operations management model to reduce the sales cycle based on BPM, CRM, and SCRUM for companies in the software sector. The model consists of 3

Each phase designed to develop the proposed strategy will be explained below.

1) *Phase 1: Problem analysis*

Conformed by the evaluation stages necessary before the implementation of the methodology. The idea focuses on making a diagnosis and analysis of the problem using diagrams, indicators, and a tree of causes. The tools used are a Pareto diagram, an Ishikawa diagram, a KPIs diagram, sales efficiency KPIs, and a cause tree. If the analysis showed a gap in the sales cycle in comparison with the duration of the sales cycle of a company belonging to the software sector, the implementation of tools to solve this problem is executed; if it showed a standard duration time according to the sector, the process is completed.

2) *Phase 2: Implementation*

It refers to implementing the proposal design through a model to apply BPM and then CRM and SCRUM. The order of execution of the tools is very important since the first stage focuses on the standardization of processes in the company and the second on the management with the client before and during the service provided.

3) *Phase 3: Data validation*

The final process conformed by the simulation that verifies the proposal's effectiveness based on the selected tools, i.e., was it possible to reduce the sales cycle? The verification also involved re-evaluating indicators to see if they are better and favor the company's productivity increase.

C. *Indicators*

To know whether the study was successful in solving the problem, it was necessary to know which indicators were to be reduced and to know what an acceptable or good value for these annual indicators is.

- **Sales Cycle**: The average number of days or months it takes a company to close a deal [16]; reducing this through implemented tools increases consumer or customer satisfaction [17]. The sales cycle in a defined period is calculated with the following formula (1):

$$\frac{\sum Total\ days\ or\ months\ to\ close\ business}{Number\ of\ closed\ customers} \quad (1)$$

- **Average delay due to low price standardization:** The company does not currently have standardized prices for the different products and countries in which it operates, so there is a delay in negotiation as soon as prices are communicated to the client (2).

$$\frac{\sum Days\ of\ delay\ due\ to\ low\ standardization}{Number\ of\ closed\ customers} \quad (2)$$

- **Average number of calls per customer**: On average, during the current sales cycle there were 9 calls with each client before closing a sale. This means a long delay as calls must be arranged at times when both parts coincide to discuss negotiation points that can be standardized (3).

$$\frac{\sum Calls}{Number\ of\ closed\ customers} \quad (3)$$

- **Average delays due to client non-compliance**: When proposals or contracts are delivered to potential clients for review, they normally entered the client's legal area to ensure that everything was correct. Often, the legal area commits to issue a response by a specific date but failed to do so for various reasons (4).

$$\frac{\sum Days\ of\ delay\ due\ to\ noncompliance}{Number\ of\ closed\ customers} \quad (4)$$

- **Average delays due to personnel turnover in clients:** This delay occurred when, during the negotiation process, the person with whom the company has been dealing with left the client's company. This delayed the process because the negotiation had to be restarted with the new person in charge and there are times when the priority of contracting the product offered by the company is reduced with the change in the client's personnel (5).

$$\frac{\sum Days\ of\ delay\ due\ to\ rotation}{Number\ of\ customers} \quad (5)$$

- **Average customer response time:** Once a document, email or request was sent to the client, they took approximately 5 business days on average to respond. This wait meant a long delay in the sales process (6).

$$\frac{\sum Customer\ response\ days}{Number\ of\ closed\ customers} \quad (6)$$

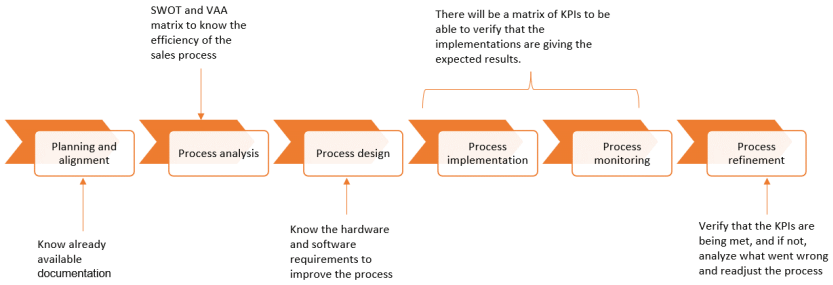


Fig 3. BPM application in the company.

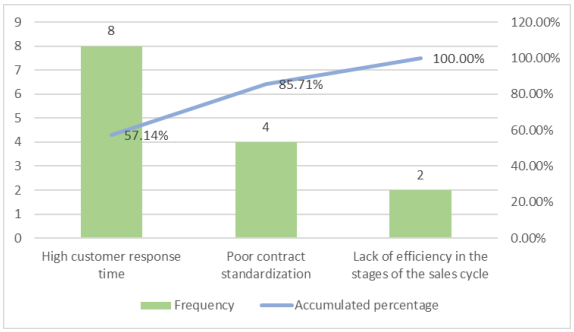


Fig 2. Quantification of root causes.

IV. VALIDATION

A. General diagnosis

The company's initial diagnosis showed that the technical gap between the average sales cycle for the industry and the current sales cycle of the company is 35 days. This long duration was mainly due to three key situations: high customer response time, poor standardization of contracts and low efficiency in the stages of the sales cycle. This meant an annual loss of $72,542.82, which represents 5.32% of annual revenue for this medium-sized company.

B. Current situation

The company's sales process currently begins when a potential customer organically entered the website, or a sales representative contacted one of them by email or LinkedIn. Then, these potential clients went through 6 stages until finally closing the business and starting to generate income for the company monthly. As can be seen in Figure 2, when sampling the reasons why the duration of the sales cycle is so high, it is concluded that the main causes were: non-compliance with customer deadlines, delays due to low standardization of contracts and low efficiency in the stages of the sales cycle, which translates into a high number of calls in the development of each sale.

C. Proposed sales process

The proposal is to improve and shorten the sales process using the tools mentioned above. The improvements made by each tool were the following:

- **BPM:** BPM was used to standardize the products and prices offered by the company. In this way, it was intended to reduce the times of negotiation and legal review by the client. The 6 improvement processes with BPM applied to the company are shown in Figure 3.
- **CRM**: The CRM was applied to change the sales process from the beginning. To begin with, the entry flow of potential customers went from being just one to being 2 different channels. In this way, not only did potential customers find and contact the sales representatives, but also, thanks to the automation and marketing tools of the CRM, they were able to attract potential customers organically. This new flow of organic clients had a lead scoring system [18] obtained by different factors granted by the CRM such as industry, number of employees, product, and country where the services were required. If the incoming customer through marketing was qualified, an email is automatically sent with the details to coordinate a first call, just like customers who came in through contact from sales representatives. On the contrary, if the marketing client was not qualified, there is a qualification call to see if the company can meet the client's requirements and if this was the case, the process continues, if not, the client left the process of sales. Finally, all the reports, automations and marketing tools offered by the CRM were used to analyze which processes could be improved and reduce time even more.
- **Scrum:** The Scrum helped to reduce the client's response time since a 4-Sprint negotiation process was implemented with the client [19], where specific dates and deliverables were agreed to move forward with the negotiation in a constant manner and without delays. Each of these Sprints had a maximum duration of 20 days, where at the beginning, the dates and deliverables that must be reviewed at the end of the Sprint were agreed with the client. In this way, there was a greater traceability [20], and it boosted the response time by the client, also responsible for each task was defined during the sprint so that each person knows who to turn to in case of delays or questions. The main responsible for the Sprint on the company's side were the sales representatives and lawyers to be aware of any requirement that the client needs during the Sprint period. The objective is that at the end of Sprint number 4, at most, the final contract was signed by the client and work can be done with them.

The new sales process can be seen in detail in Figure 4.

D. Validation design

The previously mentioned model was tried into an Arena simulation applying the improvements of BPM, CRM, and Scrum. A reduction in the sales cycle was expected after the simulation, for which the expected results are shown in the following table.

TABLE I. EXPECTED RESULTS AFTER SIMULATION

Tool	Indicators	Actual	Expectation	%
General	Sales Cycle (days)	114	83	27.19%
BPM	Average delay due to low price standardization (days)	15	5	66.6%
	Number of calls	9	6	33.3%
CRM	Average delays due to customer's failure to meet deadlines (days)	26	15	42.3%
	Average delay due to customer personnel turnover (days)	7	4	42.9%
Scrum	Average customer response time (working days)	5	2	60%

E. Method

Two simulations were carried out in the Arena program: The first simulation was used to determine the number of replications required and to verify the distribution type of the

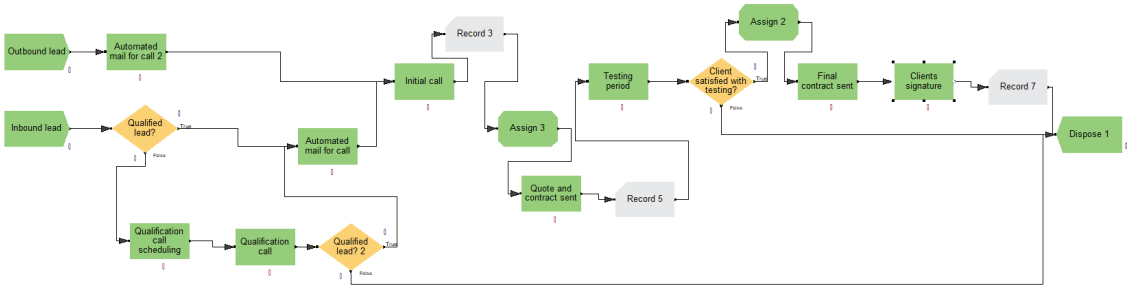


Fig 4. New process simulation in Arena software.

times of each of the processes. The second simulation was used to apply the necessary improvements and, with the same number of replications as the first simulation, find out if the tools used fulfilled their objective, which will be discussed in the next chapter.

To obtain the optimal number of replications in each of the simulations, it was assumed that the model would have a 95% confidence level and a first simulation was made with 20 replications to determine the half width, which was 9.46 days. Because the wanted half width was of 3 days for this process, the following formula was used to know how many replications were necessary to achieve the desired half width as seen in (6).

$$20x(\frac{9.46}{3})^2 = 199 \quad (6)$$

Once it was known that 199 replications of the simulation were needed to obtain the desired half width with 95% confidence, the simulation was made with 199 replications and the results were as follows for the whole sales cycle duration:

TABLE II. NUMBER OF OPTIMAL REPLICATIONS

N	Average	Half width	Minumum average	Maximum average
199	114	2.75	64.39	159.74

V. RESULTS

Once the respective simulation was carried out, the necessary results were obtained to know if applying the tools effectively reduced the company's sales cycle. "Record" modules were used in Arena after the sales processes where improvements needed to be analyzed, and the following was obtained:

TABLE III. RESULTS AFTER SIMULATION

Indicators	Before simulation	Results after simulation	Reduction
Sales Cycle (days)	114	81.12	28.84%
Average delay due to low price standardization (days)	15	4.76	68.27%
Number of calls	9	6	33.33%
Average delays due to customer's failure to meet deadlines (days)	26	18.31	29.58%
Average delay due to customer personnel turnover (days)	7	4.3	38.57%
Average customer response time (working days)	5	3.6	28%

The first result that was observed is the total sales cycle time after applying the improvements. It can be seen that there was an improvement, as expected, and not only was the

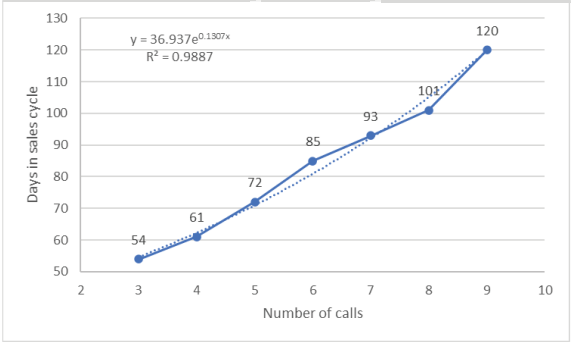


Fig. 5 Sales cycle duration due to calls.

Sales cycle time was reduced to 83 days, but it was reduced to 81.12 days on average.

Also, the simulation showed a total of 60 calls during a year, which averages approximately 6 calls per incoming customer. According to the diagnostic study, the average sales cycle time because of calls would be reduced from 120 to approximately 85 as shown in Figure 5.

Another indicator that had a significant reduction was the delay of the contract to the client due to price standardization and non-compliance with deadlines, which previously averaged 41 days, now reduced to 23.07 days.

Finally, the total contract signing period for the client was 30.91 days on average, which takes into account all delays on the client's part and the client's response time. Before the simulation, this total time averaged 53 days.

VI. CONCLUSIONS

The proposed model was validated with the simulation and proved effective in meeting the objective of reducing the sales cycle of an SMB in the software sector. As for the BPM, it was able to standardize contracts and prices, which reduced the delay times for contract review by the company and its customers. CRM helped automate and shorten processes within the sales cycle, as well as document all the steps in the negotiation process between both parties.

With the reduction of the sales cycle, the company could generate higher revenues since, with the same resources, it will be able to close a more significant number of customers. In addition, the operational workload of sales reps would be reduced due to the automation implemented, and they will be able to work more on purely customer-focused tasks.

For better results, it would be convenient to apply this same model in a pilot within a company of the same sector and to know, for example, the effectiveness of the Scrum tool in real situations since, for this tool, assumptions were used.

Seeing the favorable results of the study, it could also be concluded that this model, with some changes, could serve to reduce the sales cycle in SMBs in other industries.

VII. REFERENCES

[1] M. Á. Fernández y R. Pajares, "La digitalización del mundo industrial", *Aplicaciones Industriales*, 2019. [Online].

Available: https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicaciones periodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/405/FERNANDEZ%20Y%20PAJARES.pdf. [Accessed: 16 Nov 2021].

[2] J. Huapaya. "Apesoft". Asociación Peruana de Software. https://apesoft.org/. [Accessed: 18 Nov 2021].

[3] Instituto Nacional de Estadística e Informática, "Estadísticas de las Tecnologías de la Información y Comunicación en los Hogares.", 2020. [Online]. Available: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_tics.pdf BPM quote. [Accessed: 17 Nov 2021].

[4] M. Zahar Djordjevic, A. Djordjevic, E. Klochkova y M. Misic, "Application of Modern Digital Systems and Approaches to Business Process Management", *Sustainability*, vol. 14, n.º 3, p. 1697, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su14031697. [Accessed: 1 May 2022].

[5] A. Bojanowska, "Improving the competitiveness of enterprises through effective customer relationship management", *Ekonomia i Prawo*, vol. 16, n.º 4, p. 359, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.12775/eip.2017.025. [Accessed: 1 May 2022].

[6] B. Chaitanya Krishna, A. Yeshwanth Srinath, N. Bhavani y G. Jaya Sai, "Analysing software quality using cmmi-2 with agile-scrum framework", *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, n.º 1.1, p. 290, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.14419/ijet.v7i1.1.9704. [Accessed: 1 May 2022].

[7] A. Makasi, "The Impact of Operational Customer Relationship Management on Customer Loyalty", *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.5901/mjss.2014.v5n23p291. [Accessed: 1 May 2022].

[8] P. Kumar, A. Mokha and S. Pattnaik, "Electronic customer relationship management (E-CRM), customer experience and customer satisfaction: evidence from the banking industry", Benchmarking: An International Journal, vol. 29, no. 2, pp. 551-572, 2021. [Online]. Available: 10.1108/bij-10-2020-0528 [Accessed 1 May 2022].

[9] Rizanova,Anna; Lubica Gajanova and Margareta Nadanyiova, (2018), Design of a CRM Level and Performance Measurement Model, *Sustainability*, 10, (7), 1-17

[10] Kumar, V; Smart, P.A.; Maddern, H.; Maull, R.S. Alternative perspectives on service quality and customer satisfaction: The role of BPM. *Int. J. Serv. Ind. Manag.* 2008, *19*, 176–187.

[11] Sitorus, T.; Yustisia, M. The influence of service quality and customer trust toward customer loyalty: The role of customer satisfaction. *Int. J. Qual. Res.* 2018, *12*, 639–654.

[12] D. Grigori, F. Casati, M. Castellanos, U. Dayal, M. Sayal y M.-C. Shan, "Business Process Intelligence", *Computers in Industry*, vol. 53, n.º 3, pp. 321–343, abril de 2004. Accedido el 1 de mayo de 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compind.2003.10.007. [Accessed: 1 May 2022].

[13] Pereira, J.L.; Freitas. Towards a characterisation of BPM tools' simulation support: The case of BPMN process models. *Int. J. Qual. Res.* 2019, *13*, 783–796.

[14] K. Schwaber y J. Sutherland, "The Scrum Guide," The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game, 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/2RHk64q.

[15] "What is a Sprint in Scrum?", *Scrum.org*, 2022. [Online]. Available: https://www.scrum.org/resources/what-is-a-sprint-in-scrum. [Accessed: 30 Jun 2022].

[16] "Sales Cycle Length", *Klipfolio.com*, 2022. [Online]. Available: https://www.klipfolio.com/metrics/sales/sales-cycle-length. [Accessed: 15 Sep 2021].

[17] Woźniak, J. (2020). Gamification for Sales Incentives. *Contemporary Economics*, *14*(2), 144–161. https://doi.org/10.5709/ce.1897-9254.337

[18] "Lead Scoring: ¿Qué es?", *Inboundcycle.com*, 2022. [Online]. Available: https://www.inboundcycle.com/lead-scoring-o-calificacion-de-leads. [Accessed: 03 Jul 2022].

[19] A. Alhazmi and S.Huang "A Decision Support System for Sprint Planning in Scrum Practice", 2018, doi: 10.1109/SECON.2018.8479063.

[20] A. muayad younus Alzahawi and M. Abumandil, "Evaluating the role of scrum methodology for risk management in information technology enterprises," J. Inf. Technol. Comput., vol. 2, no. 1, pp. 1–8, Jul. 2021, doi: 10.48185/jitc.v2i1.159.

Production management model based on Lean and DDMRP tools to increase the rate of project compliance in manufacturing SMEs in the metalworking sector

Anthony Gonzales-Romero
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
20180816@aloe.ulima.edu.pe

Ibett Johana Huamani-Martinez
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
20182725@aloe.ulima.edu.pe

Juan Carlos Quiroz-Flores
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
jcquiroz@ulima.edu.pe

Bertha Haydee Diaz-Garay
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima, Perú
bdiaz@ulima.edu.pe

***Abstract*— Companies in the metalworking sector have problems when carrying out their work or projects; many of them are based on the inoperability caused by different factors during their production; among them are problems with inventory, and machine failures, among others, which leads to decreased compliance rate. By this, it is essential to carry out correct planning in purchasing materials and supplies for a good supply prior to a project; Likewise, perform periodic maintenance on the machines to keep them operational throughout the project. This was done using Lean tools like 5S, Just in Time (JIT), TPM, and ABC. In addition, DDMRP was used to manage inventory control better and increase the number of current projects without delays due to lack of supplies by 2.45% and the indicator of orders to suppliers delivered at the current time by 30.74%. After the simulation in the Arena software, the improvement could be observed in them, in the first in 63.81%, and the second in 28.74%.**

***Keywords*— DDMRP, JIT, TPM, Lean, Metalworking**

I. INTRODUCTION

The non-primary manufacturing industry of intermediate goods is among the main activities that drove the industry's growth. The manufacture of metal products for structural use represented 56.78% of the intermediate goods item in 2021. This was due to the increase in the manufacture of metal construction materials destined for the internal and external market [1]. In this sector, more than 24 941 registered companies work in this area; therefore, these are responsible for providing jobs to more than 86 691 people, equivalent to 1.75% of total manufacturing PEA, which is 13.9%. In the report of [2], it is estimated that for this year, the sector will have a growth of 1.4% since the companies belonging to this item chose to access the "Reactive Peru" program, which could reduce the consequences of the economic paralysis that the country had during the pandemic [2]. One of the main problems in this area is the delay in production due to the presence of downtime found throughout the project management process, which can be caused by communication between stakeholders, and lack of materials, among others.

The drawback that could be identified according to the literature leads us to make a case study of a Peruvian company belonging to the metalworking sector, where its main problem is that it does not comply with the deliveries of finished products on time due to its shortage of materials, delay in the execution of design plans, change of characteristics by the customer and production delays [3]. Likewise, it was possible to analyze a Colombian company, where problems were presented due to the lack of order because they did not correctly take advantage of the spaces, resources, and even the impacts on the environment; in addition to this, the presence of personnel not formally trained or with technical preparation is added [4]. Finally, like the previous ones, another Peruvian company has problems that could be found through failure analysis. These were defects and rework, defects in the start-up of machines, waits, and stops, speed reductions, breakdowns, and equipment failures, among others [5]. The cases described above show that the metalworking industry presents deficient processes, which need to be improved to increase business efficiency and, therefore, the profit margin.

The proposed case study seeks to increase productivity in a Peruvian company that specializes in manufacturing metal assemblies in the metalworking sector. The problems identified were the company's poor supply and excessive downtime in production. In order to solve the problems encountered in the production area, different engineering tools such as the 5S methodology, the Total Productive Maintenance program, and Just in Time purchases are proposed. Likewise, it will seek to strengthen a program called Demand Driven Material Requirement Planning (DDMRP) since this is a method that focuses on continuous improvement. Finally, it will seek to implement a Lean Construction tool called Last Planner System (LPS). In addition to the tools, an audit will be carried out to monitor the results of the implementations.

II. LITERATURE REVIEW

A. Measuring productivity in the metalworking sector

The organizations of the metalworking sector are characterized by the realization of deliverable projects on specific dates and agreed with the client; due to this, their productivity can be generalized in an indicator "Projects/works delivered on time" however, the difficulties present in the process cause delays, making this indicator less and less, among which we have the continuous failures in the manufacture of batches, absence of maintenance programs for machines in the production process [6]. Likewise, to have a record of the good or bad management of the projects carried

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00015

out and to be able to focus on an achievable productivity goal according to the given follow-up, monthly audits are implemented [7].

On the other hand, to produce an increase in productivity, an initial investment in equipment has to be made, so many companies in the metalworking sector choose to implement Lean Manufacturing tools since apart from being one of the most economical solutions and ensures positive results [8]

A. Lean 5S methodology in the metalworking sector and similar

The 5'S system is a systematic approach that organizes and standardizes many orders and cleanliness routines in the workplace. This method helps to increase occupational safety, prevent stock waste and improve the efficiency of work area controls, as well as determines how work areas should be maintained in order to maximize effectiveness and productivity [9]. The 5'S methodology belongs to the Lean Manufacturing toolkit. It is the first tool that must be implemented in medium and small companies if a complete management system implementation is to be covered [10]. Metalworking companies present different problems caused by the lack of a culture of order and cleanliness and the incorrect classification of materials. To prevent them, we must start by raising awareness and training the methodology staff [11]. One of the main problems identified in the manufacturing sector is low productivity caused by different causes, such as excessive time in the production process for which it is sought to reduce manufacturing times. Also, the breach of the established deadlines of the orders to solve this is essential for the preventive maintenance of the machines and the reduction of inappropriate activities or processes that do not add value [12].

On the other hand, to increase productivity and reduce downtime, the 5S methodology is executed by applying training to use this tool correctly, in addition to constant supervision in the different areas [13]. In the same way, it must implement formats and techniques to develop the processes, which can make materials necessary for the activity, crew assignment, and the 5S – Check List monitoring format, among others. These will allow constant evaluation and continuous improvement [14]. Finally, implementing the 5S method can benefit the reduction and organization of the total area used to minimize search activity [15].

B. ABC methodology in the metalworking sector

The classification of ABC inventories is a methodology to encompass references of inputs or products according to their hierarchy in 3 categories: A, B, and C. The relevance of the product will be due to its cost. Likewise, identifying the importance will allow decisions to be made and prioritize warehouse resources towards the products that have the most significant impact on business objectives so as not to waste efforts and goods equally on all products [16]. One of the main problems of companies in the metalworking sector is the difficulty in locating materials to execute orders and the inaccuracy of inventories, among others. In another sense, the storage cost of companies in the sector is very high; therefore, the ABC classification seeks to reduce these costs and thus generate greater profitability. In the research of Terrones Tinoco (2020) [17], the considerable reduction of costs was demonstrated when implementing the ABC methodology, in addition to the fact that the reduction of waste could be demonstrated, which generated an increase in productivity and profitability.

On the other hand, it was shown that companies that did not follow the ABC order in their inventories did not optimize the process and had losses of unused inputs, which were discarded due to expiration or dryness. Likewise, by carrying out a hierarchy of orders in the products following the ABC methodology in the warehouse of metalworking companies, the reduction of excessive purchases of materials has been established [18].

C. Implementation of Total Productive Maintenance (TPM) in companies in the metalworking sector

Total Productive Maintenance (TPM), known by its acronym in English of T (Total), P (Productive), and M (Maintenance). This tool is used in the metalworking sector to increase the efficiency of the machines to be used in the production processes, as well as to increase their useful life, because it provides maintenance management, prioritizing preventive maintenance, and avoiding corrective maintenance [18]. There is also an indicator called "Overall Equipment Efficiency" (OEE) directly related to equipment performance, quality, and availability. In other words, the OEE measures the current performance of machines or equipment related to their ability to perform under optimal operating conditions [19] by measuring the equipment's availability, performance, and quality rates. For this reason, this indicator is used to measure the current efficiency of the machines and the efficiency after the implementation of the TPM. In the metalworking sector, ideal OEE values are suggested at 85% (known as a world-class value), i.e., with an availability rate of 90%, yield rate at 95%, and quality at 99% [18]. Likewise, this indicator can be considered unacceptable (OEE< 65%), regular (65%<OEE< 75%), acceptable (75%< OEE < 85%) good (85%< OEE < 95%) and excellence (OEE ≥95%) [19]

On the other hand, implementing the TPM avoids stoppages in the machines due to their failures, in addition to reducing the defects that may harm the product quality [3]. Likewise, [19] they assure that, by having good maintenance management, the downtime in the productive processes of the machines is reduced and that all these benefits will increase the productivity of the production in the metalworking sector; therefore, the net profits for the organization will be increased.

D. The implementation of the DDRMP methodology in the metalworking sector and similar

The Demand-Driven Material Requirement Planning (DDMRP) methodology allows for to manage and plan supply chains in order to improve the creation, protection, and acceleration of the flow of relevant materials and information, the priority of this flow is determined by the existence of an actual customer demand [20]. This methodology comprises five steps: strategic positioning of the inventory, buffer profiles and levels, dynamic adjustments, demand-based planning, and visible and collaborative execution [21]. According to [21], many metalworking companies or other sectors are exposed to different problems caused by poor storage management, one of them being inadequate inventory control that enters and leaves, causing the delay in the delivery of projects.

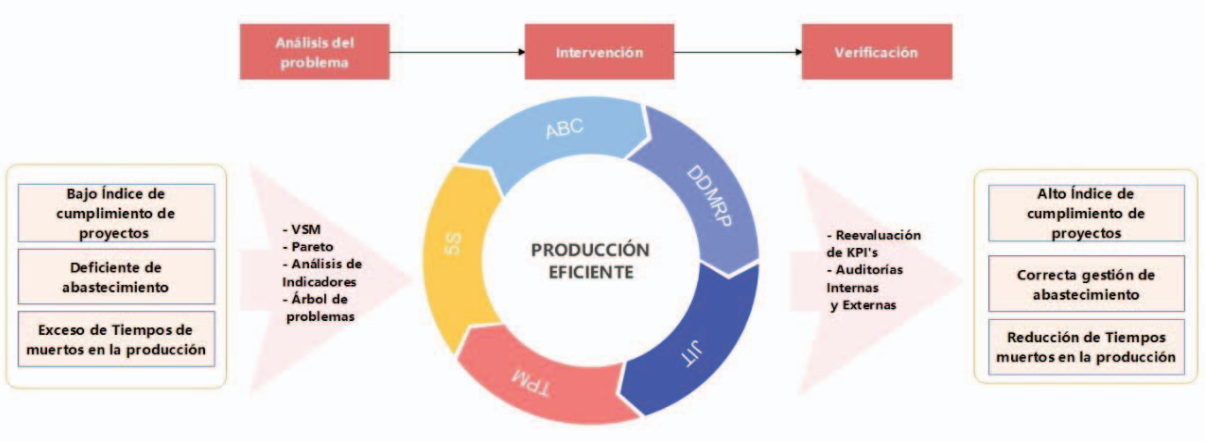


Fig. 1 Proposed model

Therefore, implementing this method will have a flexible structure to face the continuous demands of customers and the market since there is variability in demand, thus increasing cash flow, profitability, and income [22], [23]. According to the research [23], the effectiveness of this methodology is shown in the following data, it reduces inventory levels by 31% on average, improves the service level by 13% on average, as well as reduces the waiting time of the consumer order and reduces urgent or last-minute orders.

E. Benefits of JIT in metalworking companies

The Just in Time (JIT) tool is one of the best for production because it mitigates waste such as stocks, decreases activities that do not add value to the process, and avoids extensive deliveries of unnecessary projects [24]. However, one of the main problems of metalworking companies is the poor coordination between them and the suppliers of raw materials and inputs because they often fail to comply or present delays when placing an order, thus harming the production process [24].

In another sense, by implementing this tool during the raw material selection process, the problem of poor coordination between the business entity and its supplier can lead to it. Therefore, in Peru, a company dedicated to manufacturing cryogenic pipes implemented this tool to establish a good selection of raw materials following delivery policies to avoid production delays [24].

III. CONTRIBUTION

A. The rationale for the model

Currently, many companies dedicated to the metalworking sector have low productivity due to poor materials management and working times. This generates delays in the delivery of projects, which directly harms the annual income of companies. In order to mitigate the existing problems, different proposals formulated in different research articles were analyzed, which are based on the application of Lean engineering tools that provide continuous improvements such as 5S, ABC, JIT, and TPM; Likewise, it seeks to implement DDMRP to achieve an adequate supply prior to the realization of the project. These tools will be used in order to achieve an increase in productivity and increase the rate of compliance of projects. Furthermore, the contribution of the proposed model seeks to reduce downtime and improve supply management. Likewise, it will seek to establish business standards and audits that allow constant control of what is implemented.

B. Model Components

The value that the proposed model seeks to generate was established through state-of-the-art methods and the application of engineering tools as the primary solution to previously found problems. These tools are focused on optimizing the productivity of the company, so to improve inefficiency in work management was determined the implementation of constant audits, also to reduce the absence of order and cleanliness, in addition to improving the distribution of jobs will be used 5S methodology in the same way, to reduce downtime or unnecessary downtime due to incorrect planning of the materials to be used the management of the DDMRP tool is proposed. Likewise, JIT purchases will be applied to possess the necessary amount of materials and inputs used in the projects. Furthermore, the TPM (Total Productive Maintenance) method will also provide periodic and preventive maintenance to the machines.

1. Problem Analysis

The problem that has been identified in the companies that are dedicated to the manufacture of metal assemblies is the non-compliance of the projects since there are delays in the processes such as stop times, the low efficiency of the machines, and incompatibility in the plans, among others, these factors lead the companies to lengthen the number of days that were forecast for the work to be done,

Metalworking companies offer their services, so it is essential for the correct management of personnel since trained and qualified workers are needed to perform the assigned work. Also, adequate management of the processes must be maintained to improve the monitoring and control of the results obtained. It is essential to keep in mind that customers are the key to any business. Therefore, to succeed in the project, we seek to meet their requirements in the realization of the projects, understanding the needs, the expected benefit, and the value of the project so as not to incur failures that would put the fulfillment at risk of the projects.

2. Intervention

The second phase consists of implementing the tools to solve the problems encountered. The first methodology to be executed is the Lean 5S tool, which aims to improve order and cleanliness in the production process areas, thus achieving the correct performance of operations, as well as the performance of workers, positively

impacting the quality of the product and business productivity. To put this tool into practice, the following activities are carried out:

- Conduct staff training on the importance of the 5S methodology.
- Order and classify the materials and inputs necessary to manufacture the products, thus seeking to eliminate surplus or obsolete materials.
- Carry out and implement a cleaning program to maintain the appropriate work area and perform a constant inspection to ensure compliance with this plan.
- Employ control techniques such as an order and cleanliness checklist in the work area, control logs, and frequent monitoring.

As a complementary tool for the 5s, we will use the ABC analysis methodology since this allows us to classify the inventory under different criteria, such as the relevance of the material during the production process, which depends on its ease in its purchase and according to its cost. To implement this tool, the following steps will be performed:

- First, define priority criteria.
- Second, carry out the classification of inputs and raw materials.
- Third, organize the material and supplies within the warehouse.
- Implement warehouse policies.

The third tool to implement is the DDMRP because it positions the inventory stock during the supply process, establishes the levels of variable inventories to be able to respond to the different changes in demand, which generates good orders to correct supply problems, in addition to monitoring the behavior of the process and allows mitigating errors between what was planned and its execution. The steps to follow to run this tool are:

- Strategically position inventories.
- Define the area corresponding to each inventory.
- Mark the areas with green, yellow, and red colors as visual warning codes according to the factors of daily consumption, waiting time, and minimum order quantity of inputs or raw materials.
- Establish the difficulties that may harm the process.
- Create sourcing orders aligned to inventory information in the warehouse and demand.
- Monitor the behavior of the use of the tool.

The following tool to consider is Just in Time because it seeks to reduce the losses from buying the raw material to the use in the production of the same. The steps to follow with the implementation of the tool are as follows:

- Staff training.
- Establish strategic alliances with suppliers
- Establish the number of inputs and raw materials needed for the project
- Buy the number of inputs determined.
- Track the purchase.

Finally, the TPM tool is executed, which is used since it wants to maximize the availability of the machines. In the same way, it seeks to avoid unexpected failures which lead to generating defective products and unnecessary para times. To put this tool into practice, preventive maintenance must be performed on the machines to guarantee that they are in optimal condition, reducing inventory levels and preventing significant repairs in the future. Likewise, the operators in charge of the machines must be empowered to increase productivity, efficiency, and safety.

- Carry out constant training to employees on the use of machines because it seeks to reduce occupational accidents.
- Implement a maintenance plan, counting on the three existing types of maintenance (daily, preventive, and corrective) to reduce the deficiency of the machinery.
- Perform constant cleaning of the machines. For this, must eliminate the existence of dust and check the oil level, among others.

3. Model Verification

In this last phase, *internal and external audits* are carried out to preserve the activities imposed when implementing the tools and thus ensure continuous improvement in the processes. Likewise, a reevaluation of the KPIs is carried out to verify the effect of implementing the proposed tools and check if the objectives are being achieved. Finally, a comparison is made between the indicators of phase 1 with the indicators determined when the solution tools have already been implemented; this is because it is desired to determine the impact generated by the proposed model.

C. Indicators

The indicators to be used for 5S and ABC methodology are:

- Percentage of Areas organized correctly

$$\frac{Properly\ Organized\ Areas}{Total\ areas}\ x\ 100 \qquad (1)$$

The indicators proposed for the DDMRP methodology are as follows:

- Number of Projects without delays due to lack of inputs per year

$$\frac{Projects\ without\ delays\ for\ supplies}{Total\ projects} \qquad (2)$$

The indicators that will be used to monitor the JIT methodology are as follows:

- Orders to suppliers delivered on time

$$\frac{Supplier\ orders\ delivered\ on\ time}{Total\ orders\ to\ suppliers} \qquad (3)$$

The indicator to be used to measure Total Productive Maintenance is:

- The total effectiveness of equipment and tools: This indicator is best known by its acronym OEE, which according to Nakajima (1988), suggested that its ideal value is 85%. The OEE measures the machines' actual performance with their performance capacity in optimal conditions. However, it is the result of the multiplication of 3 additional indicators: Availability Rate, Rate of Return, and Quality Rate (Abregú Custodio & Bedoya Guerrero, 2021).

  - Availability Rate:

$$\frac{Productive\ time\ (hrs)}{Available\ Time\ (hrs)} \quad (4)$$

  - Rate of Return:

$$\frac{Total\ Pieces}{Operating\ time\ (hrs)}\ x\frac{1}{Capacity\ (units/hrs)} \quad (5)$$

  - Quality Rate:

$$\frac{Pieces\ made\ correctly}{Total\ pieces\ made} \quad (6)$$

IV. VALIDATION

A. Scenario Validation

To quantify and manifest the improvements obtained with the proposed model, a simulation will be developed using the Arena software, representing the manufacturing process of metal assemblies. It is necessary to add that specific data will be used, such as optimal sample size to find it will be used Minitab software, entities, and resources essential for the execution of the production process, the scope of the system, and variables.

B. Initial Diagnosis

The compliance rate of the projects that CONACERO SAC has was measured every quarter during the last two years. An average of 93% was obtained, compared with the industry-standard being 100% compliance, resulting in a technical gap of -7%.

The current economic impact of the company is S/. 235,249.20 for lost opportunity cost represents 5.15% of the company's profit during the years observed. This impact is caused by projects not being delivered on time since the time agreed in the contracts is not reached. It is also caused by the economic losses represented by the times of stops or delays in production. The leading causes of these problems that must be solved immediately are *poor supply* and *excess production downtime.*

Likewise, two main drawbacks were found that cause the company's supply to be deficient. In the first place, the miscalculation of inputs necessary for the work causes the expected results not to be obtained on time due to the lack of raw material or indispensable inputs for the project that is carried out. Secondly, the company has an incorrect distribution of storage since, by not registering some inputs, these cannot be located on time or are simply considered non-existent, generating extra expenses since the decision is made to make additional purchases of these inputs.

Respect to the problem of excess production downtime is due to two reasons. First, these are the failures in the machines because they usually perform reactive maintenance instead of preventive, which causes failures in production generating stops or poor quality in the product. The other reason is the delay in the delivery of orders by suppliers, which implies that the inputs must be waited for much longer to start carrying out the project, increasing the production time of this.

Next, the indicators to be improved to solve the problems mentioned earlier will be presented.

TABLE I INDICATORS TO IMPROVE

Tool	Indicator	Current	Objective	Variation
5S and ABC	5S Assessment Score	30	50	+20
DDMRP Methodology	Number of projects without delays due to lack of inputs	2.45%	50%	+47.55%
HIT	Orders to suppliers delivered on time	30.74%	60%	+29.26%
TPM	OEE	71.24%	85%	+13.77%

C. Validation Design

We proceeded to perform the simulation of the *Arena* software to be able to analyze in greater depth the consequences of the proposals presented in this document. First, the current model of the process will be presented to be used as a reference when the proposed model is presented with the established improvements. When performing the simulation with the proposed improvements established, a noticeable improvement in the processes that delayed and harmed the delivery of projects on time could be observed.

1. Scope of the system

The scope of the system begins from the arrival of the project until its delivery of this same. It must undergo several processes such as inspection, cutting, assembly, welding, polishing, and painting.

2. Data processed in the simulation.

To simulate the system, data analysis of the projects carried out in 2021 was carried out to obtain the appropriate and adjusted distributions that facilitate the simulation and can make accurate data known. These are the calculation of the times that each activity takes within the process of developing a project.

3. The current situation with a proposal for improvement

Some data were taken to obtain the correct number of replicas, such as 30 initial repetitions, the margin of error of 10%, a half-width of 6.51 days, and the expected one of 4 days. Thus, obtaining a number of 89 optimal replicas.

To improve the current situation, the warehouse had to be reorganized following the guidelines of the 5S and ABC tools. Likewise, periodic maintenance was established for the machines for their operational continuity. Additionally, inventory planning was established prior to the execution of the projects using the DDMRP tool. Finally, typical agreements were implemented to

implement JIT when searching for materials, coordinate with suppliers, and avoid delays.

TABLE II RESULTS OBTAINED

Tool	Indicator	As is	To be
5S and ABC	5S Assessment Score	30	50
DDMRP Methodology	Number of projects without delays due to lack of inputs	2.45%	66.26%
HIT	Orders to suppliers delivered on time	30.74%	59.48%
MTP	OEE	71.24%	85%

An improvement in the indicators is observed, thanks to the tools shown in the table above. The score in the 5S evaluation increased by 20 points, making it easier to find the inputs and materials on time. Second, likewise, the number of projects without delay due to a lack of inputs by 63.81%. This is notorious because the materials used were planned correctly, and a good supply could be defined prior to the work or project. Third, delays in shipments by suppliers resulting in a 28.74% increase in orders to suppliers delivered on time were decreased. Finally, the machines operate with greater efficiency, quality, and performance due to the implementation of periodic maintenance that began to be carried out, so the OEE increased by 13.77%.

4. Pilot Test Results

After testing our proposals for 3 months, it was possible to show favorable results about our project. The first of them was to carry out training on the 5S, which reflected an improvement in the staff, because they became aware of the order that the warehouse should have, leading to a reduction of 23.86% in search times for instruments and supplies for the manufacture of metal assemblies. Likewise, by implementing TPM, that is, the planning of preventive maintenance for machines, setbacks due to failures in these machines were reduced by 35.49%. Both results were economically reflected in an increase, obtaining profits of S/. 30,541, which compared to the previous regime is very favorable since S/235,249.20 was being lost annually.

Therefore, it can be affirmed that economically and methodologically, the project is viable to be implemented, in addition to presenting good results in its execution.

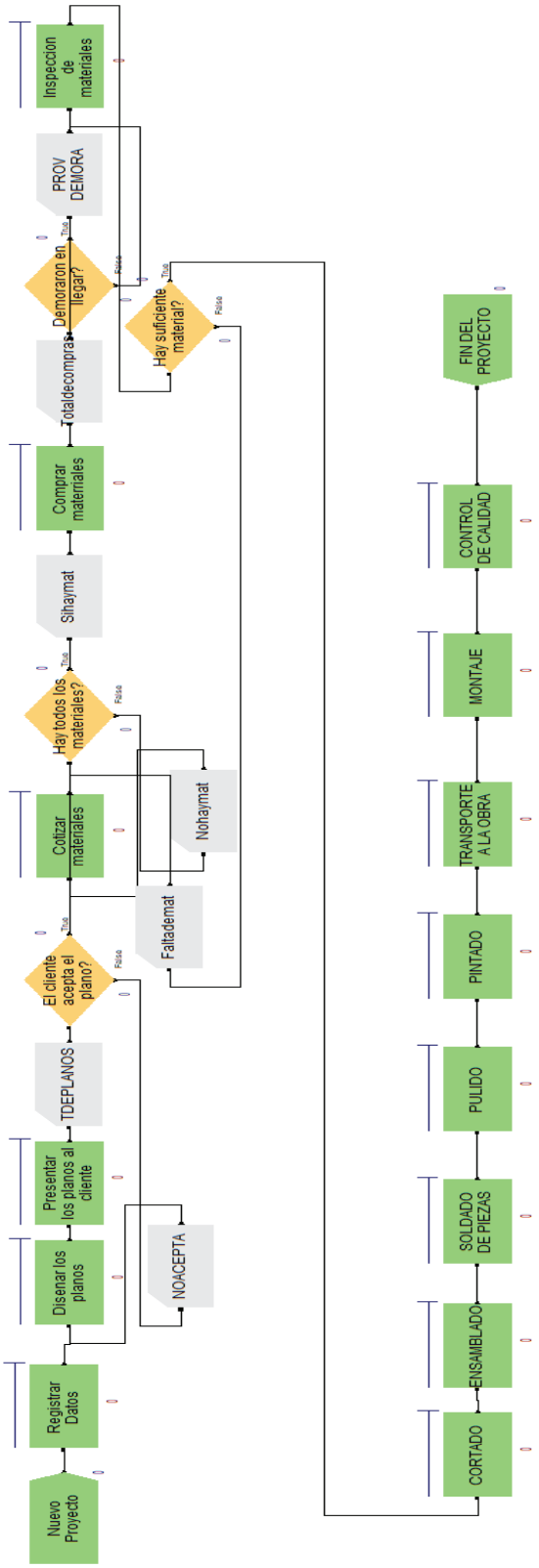


Fig. 2 Simulation of the project realization process - Current Model

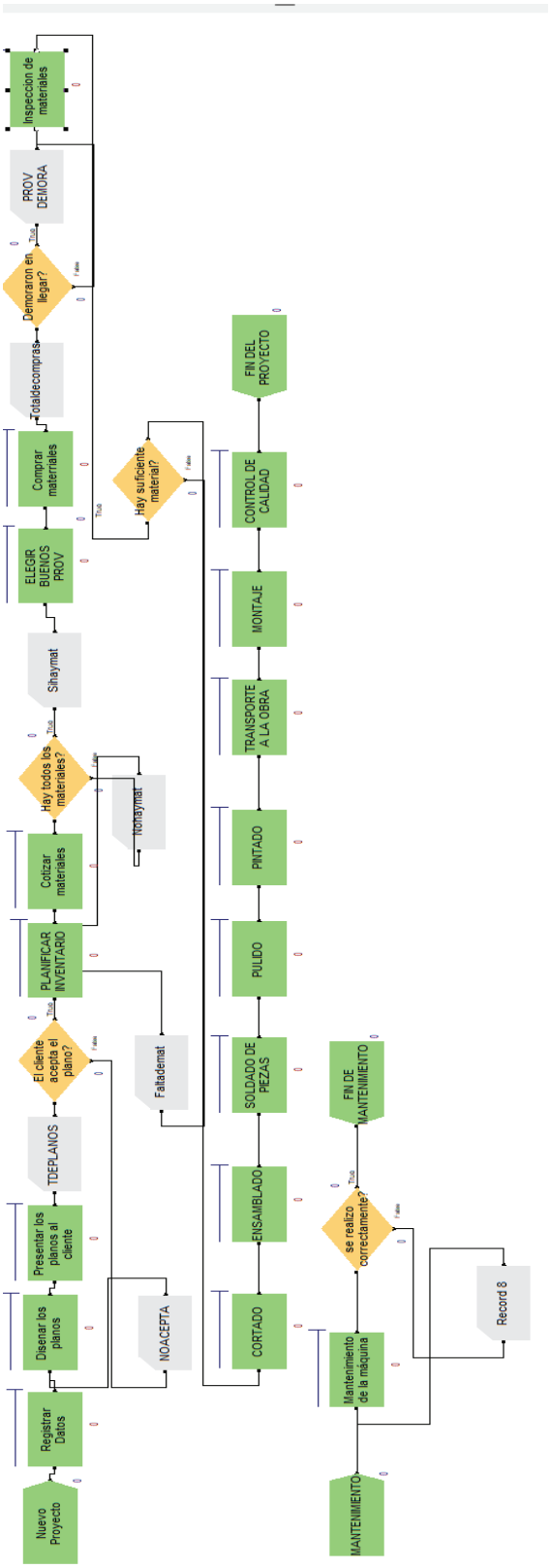


Fig. 3 Simulation of the process of carrying out a project - Proposed model

V. CONCLUSIONS

This research aimed to broaden the reality of SMEs in the Peruvian metalworking sector. The results determined an improvement according to the proposed indicators. As a result, the following conclusions are presented.

- Through the simulation, it was possible to determine an improvement of 63.81% when implementing the DDMRP tool since the number of projects without delays due to lack of inputs increased, demonstrating the effectiveness of its use for the sector.
- It was demonstrated that the implementation of the Just In Time tool made it possible to improve inventory management, reflected in the increase in orders to suppliers who arrived on time.
- By performing the analysis to give a 5S score, it was possible to identify a relevant lack in the order of inventories, which directly harmed the time of searching for them, delaying projects, or making purchases of inputs that were not available.

VI. REFERENCES

[1] National Institute of Statistics and Informatics. (2022). Domestic Production (No. 2). https://www.inei.gob.pe/media/principales_indicadores/02-informe-tecnico-produccion-nacional-dic-2021.pdf

[2] Central Reserve Bank of Peru. (2022). Current Outlook and Macroeconomic Projections 2022–2023. https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2022/marzo/reporte-de-inflacion-marzo-2022.pdf

[3] M J Shofa et al (2018). Effective production planning for purchased part under long lead time and uncertain demand: MRP Vs demand-driven MRP. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 337 012055. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/337/1/012055

[4] Carrillo et al. (2019). Lean Manufacturing: 5 s and TPM, quality improvement tools. Case of a metalworking company in Cartagena, Colombia. SIGNS – Management Systems Research, 11(1), 71-86. DOI: https://doi.org/10.15332/s2145-1389.2019.0001.04

[5] Canahua (2021). Implementing the TPM-Lean Manufacturing methodology to improve the overall efficiency of equipment (OEE) in producing spare parts in a metalworking company. Industrial Data, 24(1), 49–76. https://doi.org/10.15381/idata.v24i1.18402

[6] Calua Villanueva, A. G., & Jara Sandoval, M. B. M. (2020). Proposal for applying Lean Manufacturing tools to improve the productivity of a metalworking company. Technological University of Peru. https://hdl.handle.net/20.500.12867/3153

[7] Terán, A. et al. Estudio comparativo de la productividad en el sector metalmecánico. Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2009) "Energy and Technology for the Americas: Education, Innovation, Technology and Practice" June 2-5, 2009, San Cristóbal, Venezuela. http://www.laccei.org/LACCEI2009-Venezuela/Papers/IE210_Teran.pdf

[8] Urzúa, M. & Mendoza, A (2019). Evaluating the impact of order picking strategies on the order fulfilment time: a simulation study.pp.100-117. http://dx.doi.org/10.22306/al.v6i4.129

[9] Guzel, Dilsad & Asiabi, Alireza. (2022). improvement setup time by using SMED and 5s (an application in SME). International Journal of Scientific & Technology Research. 9. 3727-3732. https://www.researchgate.net/publication/358747070_Improvement_Setup_Time_By_Using_SMED_And_5S_An_Application_In_SME

[10] Manzano Ramírez, M., & Gisbert Soler, V. (2015). Learning Lean Manufacturing through Minecraft: application to the tool 5S. RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação. https://doi.org/10.17013/risti.16.60-75

[11] Miller-Verano, C., et al. (2022). Increasing sales in a real estate company using 5S and Standardization Work: A case of study. 7th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Orlando, USA (IEOM).

[12] J. Oliveira, J.C. Sá, A. Fernandes (2017). Continuous improvement through "Lean Tools": An application in a mechanical company. Procedia Manufacturing, Volume 13, 2017, Pages 1082-1089, ISSN 2351-9789. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.139.

[13] Pezo-Huaman, D., et al. (2022). Safety management model based on the standardization of processes and 5S to reduce the rate of intoxication in SMEs in the chemical sector. 2022 IEEE 9th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Sanya, Hainan, China (ICIEA 2022)

[14] Huaman-Torres, M., et al. (2022). Management model based on 5s and Systematic Layout Planning (SLP) to improve the level of service in the cleaning sector. 11th Industrial Technology and Management Conference ICITM, Oxford, UK 2022.

[15] Rizkya, I., Syahputri, K., Sari, R. M., & Siregar, I. (2019). 5S Implementation in Welding Workshop – a Lean Tool in Waste Minimization. IOP Conference Series.Materials Science and Engineering, 505(1) https://doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012018

[16] Rahman, M. N. A., Khamis, N. K., Zain, R. M., Deros, B. M. & Mahmood, W. H. W. (2010). Implementation of 5S Practices in the Manufacturing Companies: A Case Study. American Journal of Applied Sciences, 7(8), 1182-1189. https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.1182.1189

[17] Ramos Farroñan, E. V., Huacchillo Pardo, L. A., & Portocarrero Medina, Y. P. (2020). El sistema de costos ABC como estrategia para la toma de decisiones empresarial. Universidad y Sociedad, 12(2), 178-183. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000200178

[18] G. Chand & B. Shirvani (2000). "Implementation of TPM in cellular manufacture". Journal of Materials Processing Technology. Vol. 103, Issue 1. Pages 149-154, ISSN 0924-0136. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00407-6.

[19] Canahua Apaza, N.. Implementation of the TPM-Lean Manufacturing Methodology to Improve the Overall Equipment Effectiveness (OEE) of Spare Parts Production at a Metalworking Company. Ind. data [online]. 2021, vol.24, n.1, pp.49-76. ISSN 1560-9146. http://dx.doi.org/10.15381/idata.v24i1.18402.

[20] Salas-Musso, R., et al. (2022). Model of Supply Chain management based on the application of Lean tools and DDMRP to decrease returns in retail SMEs. 2022 IEEE 9th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Sanya, Hainan, China (ICIEA 2022).

[21] Kortabarria, A. Apaolaza, U. & Lizarralde, A. (2018). Demand Driven MRP - New Method for Supply Chain Management: A Case Study. Dept. of Mechanics and Industrial Production. Mondragon Unibertsitatea. Loramendi 4 20500 Raze yourself-Mondragón Gipuzkoa, Spain. https://hdl.handle.net/11537/28647

[22] Kortabarria, A., Apaolaza, U., Lizarralde, A., & Amorrortu, I. (2018). Material management without forecasting: From MRP to demand driven MRP. Journal of Industrial Engineering and Management, 11(4), 632-650. doi:http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2654

[23] Pekarcıkova, M. et al. (2019) Demand Driven Material Requirements Planning. Some Methodical And Practical COMMENTS. Management and Production Engineering Review, Volume 10, Number 2, June 2019. Pp 50-59. DOI: 10.24425/mper.2019.129568

[24] Guia-Espinoza, R., et al. (2022). Lean-BPM Production Model to increase productivity in SMEs in the aquaculture sector using 5S, TQM and JIT: A research in Perú. 11th Industrial Technology and Management Conference ICITM, Oxford, UK 2022.

Technological innovation and performance of MSMEs in Panama: study in times of COVID-19

Innovación tecnológica y rendimiento de las MIPYMES en Panamá: estudio en tiempos de COVID-19

Bolívar Bernal Mojica
Facultad de Ingeniería Industrial – Centro Regional de Azuero
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
0000-0002-3834-2618

Nuvia Gisela Martez
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
0000-0002-9425-898X

Enith González
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
enith.gonzalez@utp.ac.pa

Gabriel Vergara
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
gabriel.vergara@utp.ac.pa

Edilsa Q. de Sanfilippo
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnologica de Panamá
Panamá, Panamá
0000-0003-1785-5956

***Abstract*— This paper presents the results of an empirical study, conducted during the months of February to March 2021, with the objective of analyzing innovative activity in product, process and organizational innovation and its impact on the performance of MSMEs. An online survey was conducted with the participation of 430 companies stratified according to sector (Industry, Construction, Commerce and Services) and size (micro, small and medium enterprises). The model used was multiple linear regression, whose response variable was company performance and the explanatory variables were product, process and organizational innovations. The results showed that process and organizational innovations were statistically significant, while product innovations were not significant. The coefficients were positive, implying that the higher the degree of process and organizational innovation, the higher the company's performance is expected to be. These innovations included changes in production processes, acquisition of new equipment, improvements in management, new procurement and purchasing processes, and changes in sales and commercial management. All these innovations were made during the pandemic period**.

Keywords*— *Business performance, process, product and organizational innovation, impact of Covid-19, MSMEs

***Resumen* — Este documento presenta los resultados de un estudio empírico, realizado durante los meses de febrero a marzo del 2021, con el objetivo de analizar la actividad innovadora en producto, proceso y organizacional y su impacto en el rendimiento de las MIPYMES. Se realizó una encuesta en línea en la que participaron 430 empresas estratificadas según el sector (Industria, Construcción, Comercio y Servicios) y tamaño (microempresa, pequeña empresa y mediana empresa). El modelo utilizado fue el de regresión lineal múltiple, cuya variable de respuesta fue el rendimiento de la empresa y las variables explicativas fueron las innovaciones en producto, proceso y organizacional. Los resultados mostraron que las innovaciones en proceso y organizacional fueron estadísticamente significativas, mientras que las innovaciones en producto no presentaron significancia. Los coeficientes fueron positivos, lo que implica que a mayor grado de innovación en proceso y organizacional se espera un mayor rendimiento de la empresa. Estas innovaciones abarcaron cambios en procesos productivos, adquisición de nuevos equipos, mejoras en la gestión, nuevos procesos de adquisición y compra, cambios en la gestión comercial y de ventas. Todas estas innovaciones realizadas, durante el periodo de pandemia.**

Palabras clave — Desempeño empresarial, innovación de procesos, productos y organizacional, impacto del Covid-19, mipymes

I. Introducción

Diversos estudios [1], [2],[3], [4], [5], reconocen que las micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes) juegan un papel clave en la promoción del crecimiento económico y social de las naciones, debido a que contribuyen con la producción, la generación de plazas de empleo [6] y de ingresos, aportan al aumento de la productividad y en consecuencia a la competitividad y distribución de la riqueza de los países en que operan sean desarrollados o en vías de desarrollo.

Entre las características que le proporcionan diferenciación a las mipymes, cuando comparada con las grandes corporaciones, se mencionan criterios como la flexibilidad o rápida respuesta a las exigencias de mercado y la agilidad en la toma de decisiones, gracias a que cuentan con una estructura funcional pequeña [3] que favorece el flujo de información y la comunicación. Estos criterios de desempeño son propicios para que se incorporen innovaciones [5] aunque se reconoce que la mayoría de las mipymes enfrentan debilidades en cuanto a sus competencias de gestión, de marketing y tecnológicas [4] que acaban interfiriendo o limitando el esfuerzo por generar innovaciones sistemática y consistentemente.

La actividad innovadora determina el desempeño de la empresa [7] a la hora de atender las necesidades y deseos cambiantes del cliente [8], mejorar los productos o servicios

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00016

y procesos lo que a su vez afecta el rendimiento financiero debido a que influye, entre otros aspectos, en la participación en el mercado, en el volumen de ventas, en el precio y eficiencia. Es por ello que, dado el efecto de las mipymes en la economía de las naciones se considera primordial impulsar la innovación como mecanismo efectivo para lograr competitividad y éxito no solo individualmente para las empresas sino para el crecimiento económico general del país [3], visto que la innovación es reconocida como fuente de ventaja competitiva sostenible [1] frente a competidores en un entorno de negocio caracterizado por ser dinámico y globalizado.

Adicional, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) [9] en sus estudios reconoce que la innovación puede ayudar a abordar problemáticas sociales de carácter local y global, pero alerta que se necesitan políticas que consideren el estado o nivel en que se encuentra la innovación. En el caso de las pymes innovadoras aportan a la inclusión, ya que producto del aumento de la productividad pueden mejorar las condiciones laborales y los salarios de sus colaboradores [3].

Se describe [9] que la innovación implica crear nuevos procesos, productos o métodos que sean ampliamente aceptados o valorados. De igual forma, cuando se mejoran o adicionan características a los productos existentes, a los procesos utilizados o a las formas de realizar las actividades, se entiende que se han incorporado o realizado innovaciones de producto, de proceso u organizacional utilizando el conocimiento científico, tecnológico o práctico [10]. En este estudio se considera que la innovación tecnológica abarca [4] tanto la innovación de producto, de proceso u organizacional y se analiza el impacto en el desempeño de las mipymes panameñas con el adicional de que los datos consideran el desempeño o rendimiento logrado en el contexto de la pandemia de 2020 comparativamente con el año 2019.

A. Entorno competitivo y situación de las mipymes

Desde 2020 el escenario competitivo mundial se ha transformado debido a la crisis ocasionada por la pandemia por coronavirus (COVID-19), las economías se cierran y prácticamente se paralizan [11] debido a las medidas impuestas para contener la propagación del virus afectando la educación, al sector empresarial y a la sociedad en general.

En América Latina y el Caribe (ALC) las mipymes representan cerca del 99% de las empresas en los diversos sectores [11] por lo que el cierre temporal de la actividad económica necesariamente tuvo repercusión en la generación de ingresos. El impacto económico se vio reflejado en el nivel de empleo porque al caer las ventas no sería posible afrontar costos fijos de salarios, de contribución social y otros compromisos de seguridad social, incluso provocó el cierre de muchas empresas. Los efectos de la pandemia en ALC han sido significativos con pronóstico de que el producto interno bruto (PIB) sufrirá una caída entre 3% y 4% o superior [11] dependiendo de las estrategias de recuperación que se definan en ámbito nacional, regional y mundial.

Panamá en el periodo de 1990 al 2017 presenta un PIB con un crecimiento constante promedio de 6% [12] destacándose de otros países de América Latina (AL). Esta tendencia cambió drásticamente en 2020, a raíz de la pandemia, cuando el PIB mostró una contracción económica de -17.9% en comparación al año anterior. El análisis estadístico del sector mipyme realizado por el Centro Nacional de Competitividad (CNC) [13] señala que este comportamiento negativo obedece al desempeño de muchos sectores productivos que vieron sus actividades afectadas durante el tiempo que estuvieron sometidos a restricciones de movilidad y de aperturas comerciales. El mismo informe reporta que entre las actividades impactadas sobresalen las relacionadas a los servicios personales, construcción, comercio, hoteles, restaurantes, servicios empresariales, industria, educación e intermediación financiera.

Es relevante destacar que, aunque en Panamá antes de la pandemia se registraba éxito económico los diagnósticos realizados sobre la situación de las mipymes [12] alertaban que persistían retos en materia de infraestructura, innovación, obtención de mano de obra calificada, desarrollo del mercado financiero y sofisticación en los negocios, entre otros. Queda evidente la desventaja en la que se encontraban las mipymes para hacer frente a los efectos provocados por la pandemia en ámbito económico y sanitario.

En un estudio reciente [14] se apunta a la ciencia, la tecnología y la innovación como aspectos clave en la recuperación económica y social. El informe describe elementos que deben considerarse para la efectiva y acelerada reactivación económica de la región de ALC, a saber:

- Una estrategia integral, de corto y largo plazo, que incluya el desarrollo de programas de apoyo a la innovación, a la sofisticación del negocio y al emprendimiento dinámico a la vez que considera opciones inmediatas de apoyo a la liquidez de las pymes.
- Fortalecer capacidades locales de acuerdo con las fortalezas y realidades de la región, considerando que algunas soluciones no pueden simplemente transferirse de un país a otro o de una región a otra, por no adaptarse al contexto propio y particular que viven las pymes.
- Colaboración regional desde el punto de vista de que las alianzas favorecen el aprendizaje y difusión de conocimiento entre los países de ALC logrando capitalizar las fortalezas con que cuentan cada uno de los integrantes.
- Aprovechar la coyuntura para el diseño de una agenda que incluya nuevos modelos de negocios, la transformación digital que avanzó forzadamente, así como la sostenibilidad ambiental y la inclusión social.

En el caso de Panamá mediante la Ley 8 del 29 de marzo del 2000 [12] se crea la Autoridad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (AMPYME) entidad pública responsable de regular e impulsar el desarrollo de las Micro, Pequeña y Mediana Empresa (mipyme) por medio de políticas que contribuyan a la creación de empleos productivos, el crecimiento económico y una mejor distribución del ingreso. La política nacional vigente (2017-2022) para el fomento de la mipyme panameña cuenta con un conjunto de

directrices que trazan el camino y orientan la actuación del Estado y sus instituciones en materia de fortalecimiento de la mipyme.

Considerando lo descrito anteriormente, esta investigación presenta información valiosa sobre la relación entre innovación tecnológica y el desempeño de las empresas en Panamá en circunstancias de pandemia. Los resultados pueden servir como referencia a las entidades involucradas en la reformulación de estrategias y políticas públicas de apoyo a la reactivación de las mipymes. Las hipótesis planteadas fueron:

H1: La innovación en producto influye positivamente en el rendimiento de la mipyme en Panamá

H2: La innovación en proceso influye positivamente en el rendimiento de la mipyme en Panamá

H3: La innovación organizacional influye positivamente en el rendimiento de la mipyme en Panamá

Estas hipótesis fueron probadas en una muestra de 430 empresas abarcando los sectores de construcción, servicios, comercio e industria que están entre las actividades impactadas por la pandemia como se ha señalado previamente. Los datos fueron recolectados entre febrero y marzo de 2021.

II. Revisión Bibliográfica

La relación entre la innovación y el rendimiento de las empresas son variables que por su importancia en el contexto competitivo han sido elementos clave en el esfuerzo investigativo empírico internacional. Como se ha indicado previamente en el caso específico de este estudio empírico se evalúa la innovación desde tres perspectivas: producto, proceso y organizacional y la relación entre el rendimiento de las mipymes durante pandemia. Por tanto, en esta sección se presentan conceptos asociados y algunos antecedentes de estudios similares en otros ámbitos.

A. Innovación y Rendimiento

De acuerdo con [15], [16], [17] la innovación de producto consiste en la introducción de productos en el mercado nuevos o que ha mejorado sus características o especificaciones con cambio de materiales, software o de algunas funcionalidades [9], tomando en consideración las demandas del consumidor, sus expectativas y necesidades.

La importancia de la innovación de productos se refiere al papel de este como el principal contribuyente al desempeño, ya sea relacionado con el desempeño financiero o de mercado [18]. Se ha demostrado [5] que las empresas de pequeñas y medianas escala (pymes) obtienen rendimientos mayores cuando realizan innovaciones en producto, a diferencia de aquellas que no tienen la preocupación de incorporar cambios en el negocio. Por lo tanto, la innovación es una oportunidad para que las empresas emprendedoras ganen impulso a través de las ganancias temporales que se derivan de la innovación y una actividad continua necesaria para el éxito empresarial a largo plazo [1].

En el caso de la innovación en proceso, implica la introducción de nuevos elementos, tales como: nuevos métodos de producción, nuevos enfoques administrativos y nuevas tecnologías dentro de la organización [16] [19]; con el beneficio de que ayudan a las empresas a mejorar de forma significativa su eficiencia productiva y reducir los costos. La implementación de innovaciones de proceso [20] ayuda a las organizaciones a incrementar su capacidad operacional y con ello la satisfacción del consumidor y consecuentemente el rendimiento financiero de la empresa.

Por último, la innovación organizacional consiste en una implementación de métodos y prácticas de gestión en la empresa para organizar rutinas y procedimientos de los trabajos que no solo facilitan la creación de nuevos productos y procesos, sino que permiten un aumento significativo del nivel de rendimiento empresarial [21].

Según [15], la innovación debe ser vista como una actividad de integral de la organización. Por lo tanto, todos los integrantes de las pyme deben colaborar y participar en una comunicación eficaz para mejorar el despliegue exitoso de la innovación en los negocios. Las pyme también deben garantizar la congruencia entre sus ideas innovadoras, su contexto estratégico y su entorno organizativo. Por lo tanto, las pymes deberían ver todas las dimensiones de la orientación a la innovación como determinantes importantes para su mejora.

Las pymes que tengan una alta innovación organizacional podrán competir planteando cosas nuevas que no sean propiedad de otras empresas [8]. Para un impacto positivo de la innovación y en el desempeño de las empresas se requiere la atención sobre dos puntos [10]. El primero es que al igual que las inversiones en innovación y la tecnología en uso debe ser tratada como insumos positivos en la eficiencia de la empresa y no como cifras de costos. El segundo punto es que dicha inversión debe estar relacionada con la producción y el establecimiento de los costos para una eficiente utilización de los recursos de la empresa.

B. Estudios empíricos previos

En un estudio realizado en Argentina con respecto al determinante de innovación, los autores [22] revisaron 29 estudios empíricos publicados entre 1997 y 2007 en 16 países desarrollados y 12 países en desarrollo, en los resultados de dicha búsqueda identificaron determinantes de innovación que fueron: negocio, sector y sistema. En los determinantes de innovación en negocios se encontraron aspectos como tamaño, mercado, capacidad de absorción y antigüedad, con respecto a la determinante sector están aspectos como oportunidades tecnológicas, demanda y en sistema encontraron aspecto como el soporte del sector público, el ambiente de negocio y la cooperación, tanto en los países desarrollados como en desarrollo. En el caso de los países en desarrollo, el tamaño de la empresa es un determinante positivo para la probabilidad de inversión en innovación. La capacidad tecnológica se presenta como uno de los determinantes más importantes para implementar innovación en los países en desarrollo.

Entre 1997 y 2003 en [23] se evalúo el rendimiento de 118 empresas Coreanas del sector construcción, con el objeto de verificar de manera empírica la relación que existe entre la innovación y su rendimiento. Siendo el rendimiento la variable de respuesta y las innovaciones en producto y proceso las variables explicativas. De los análisis estadísticos realizados se determinó que las innovaciones en producto y/o procesos por sí solas no tendrán efecto sobre el rendimiento de las firmas, si dichas innovaciones de producto no están orientadas a las necesidades y

requerimientos del consumidor. Un segundo resultado a destacar de este estudio es que, en entornos altamente competitivos, las innovaciones de producto suelen estar mejor enfocadas a satisfacer las necesidades del cliente y con ello tiende a mejorar la correlación entre rendimiento e innovación de producto. Para el caso de las innovaciones de proceso, si estas están de igual manera orientadas al consumidor, estarán enfocadas a actividades que impliquen la disminución de costos y eficiencias en la cadena de suministro, lo que implicaría eficiencias en términos de rentabilidad.

En 2011, [24] realizaron un estudio enfocado en determinar la relación existente entre innovación y rendimiento, en la que participaron 1400 empresas familiares pequeñas de 20 países de América Latina. El modelo estadístico empleado fue de Ecuaciones Estructurales. La innovación fue medida mediante tres dimensiones: producto, proceso y organización. El estudio concluye que el rendimiento de las empresas familiares pequeñas se ve altamente influenciado por las innovaciones, aun cuando estas sean de carácter marginal, ya que la apertura de los mercados ha demandado la rápida adaptación de estas firmas ante entornos cada vez más competitivos.

Un estudio realizado por [1] en el año 2017, demostró que las innovaciones en productos y servicios mejora de manera significativa el rendimiento de las mipymes. Es decir, las innovaciones de productos, con la introducción de nuevos o con mejoras de los existentes, acompañado de innovaciones en la calidad del servicio presenta una oportunidad para que las firmas obtengan ganancias de largo plazo y con ello asegurar la continuidad de la empresa. Para verificar lo antes expuesto, se realizó un muestreo aleatorio estratificado a las mipymes que contaban con registro en el Condado de Tharaka-Nithi, República de Kenia. El tamaño de la muestra fue de 368 empresas de un total de 8526. El modelo utilizado fue de regresión lineal simple, donde la variable dependiente era el rendimiento y la variable independiente la innovación en producto-servicio. Para obtener los valores de la variable dependiente se realizó un análisis factorial para reducir las preguntas del cuestionario en una sola. El coeficiente de determinación demostró un valor de 0.492, lo que implica que la variabilidad en el rendimiento de las empresas es explicada en un 49.2 % por las innovaciones en producto-servicio.

En el estudio [25] se evidencia que la innovación debe ser analizada desde un punto multifactorial y es el resultado de varios constructos que determinan el desempeño de las empresas. Lo que resulta innovador en este estudio es incorporar como variable las innovaciones de mercado, que para dicha investigación se definió como el proceso de incorporar las preferencias y necesidades del consumidor para definir una mejor mezcla de mercadotecnia y selección de nuevos mercados. Este estudio se llevó a cabo en la República de Ghana. La población objeto de estudio fue de 3485 empresas registradas en el Consejo Nacional de la Pequeña Industria, de las cuales se entrevistaron un total de 281. Se evaluó, empleando el modelo de ecuaciones estructurales, la influencia que ejercen las variables de innovación en producto, proceso y mercado sobre el rendimiento de las empresas. Los resultados de la investigación mostraron que las innovaciones de producto y proceso por sí solas no juegan un rol significativo en el rendimiento de las empresas. Sin embargo, las innovaciones de mercado mostraron alta significativa al orientar de mejor forma los esfuerzos de la firma a ofrecer un producto acorde con los deseos y necesidades del consumidor. A pesar de ello, se indica en el estudio que no se debe dejar de lado la importancia que tiene el realizar innovaciones de producto y proceso por parte de las empresas.

III. METODOLOGÍA

Para la obtención de los datos se realizó una encuesta en línea dirigida al gerente de la mipyme seleccionada del total de empresas registradas en el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) de Panamá.

A. Muestra

El tamaño de muestra se definió con los parámetros de 95% de nivel de confianza y margen de error muestral global del 4.7%. Con dichos parámetros se obtuvo un valor de tamaño de la muestra de 430 empresas, las cuales fueron estratificadas según el sector (Industria, Construcción, Comercio y Servicios) y tamaño (microempresa, pequeña empresa y mediana empresa). En la TABLA I se muestra la cantidad de empresas según los criterios de estratificación previamente señalados. El tamaño de la empresa se define según las ventas anuales que ésta genere, siendo clasificadas en los rangos: micro hasta 150 000 dólares, pequeña de 150 001 a 1 000 000 dólares y mediana 1 000 001 a 2 500 000 dólares [26].

TABLA I. ESTRATIFICACIÓN DE LA MUESTRA SEGÚN SECTOR Y TAMAÑO

	Tamaño de la empresa		
Sector	***Microempresa***	***Pequeña***	***Mediana***
Industria	28	21	15
Construcción	22	29	13
Comercio	38	27	10
Servicios	122	79	26

B. Instrumento de medición

El instrumento de evaluación utilizado constaba de un total de 20 preguntas distribuidas en secciones. En la sección de descripción general de la empresa se solicitaba información como: sector de actividad, tamaño, provincia donde estaba ubicada la empresa, entre otras. En otra sección se hicieron preguntas relacionadas con el impacto que tuvo la pandemia sobre la empresa, tal como: personal en teletrabajo, comparación de las ventas entre los años 2019 y 2020, entre otras. En una tercera sección se le consultó sobre las innovaciones realizadas en producto, proceso y organizacional. Y en la cuarta sección se le pedía comparar su rendimiento como empresa respecto a los competidores en materia de calidad de producto y proceso, entre otros.

C. Modelo propuesto

Para validar las hipótesis previamente definidas se identificaron las variables explicativas y de respuesta en el modelo lineal. En el caso de las explicativas, se seleccionaron las preguntas de la encuesta relacionadas con las variables innovación de producto, innovación de proceso e innovación organizacional. Específicamente, se les realizó

la pregunta "Indique si su empresa ha realizado, en 2020, las siguientes innovaciones y, en caso afirmativo, señale el grado de importancia de cada una de ellas (1-poco importante 5-muy importante)". La TABLA II muestra las preguntas relacionadas con cada factor de innovación y el valor de α de Cronbach para medir la consistencia de las respuestas. Los valores obtenidos fueron superiores a 0.60 que es lo recomendable para garantizar una confiabilidad aceptable.

TABLA II. VARIABLES EXPLICATIVAS DEL MODELO PROPUESTO

Variables	Pregunta	α de Cronbach
Innovación de producto	1. Cambios o mejoras en productos/servicios existentes 2. Lanzamiento al mercado de nuevos productos/servicios	0.859
Innovación de proceso	3. Cambios o mejoras en los procesos productivos 4. Adquisición de nuevos bienes de equipo	0.672
Innovación organizacional	5. Nuevos cambios o mejoras en organización y/o gestión 6. Nuevos cambios o mejoras en compras y/o aprovisionamientos 7. Nuevos cambios o mejoras en comercial y/o ventas	0.878
Innovación total		0.920

Las siete preguntas mostradas fueron reducidas a las variables de innovación (producto, proceso y organizacional) a través del método de Análisis Factorial por medio del paquete estadístico SPSS.

En el caso de la variable de respuesta, que se denomina rendimiento, se seleccionaron las preguntas de la encuesta que se solicitaba comparar a la firma con respecto a los competidores, la cual se formuló de la siguiente forma "En comparación con sus competidores directos, indique su situación para los siguientes indicadores de rendimiento de su empresa (1-mucho peor 3- igual 5-mucho mejor)". La TABLA III muestra las preguntas relacionadas con el rendimiento de la empresa. Para el análisis de esta variable se siguió una lógica distinta, se recalcularon las puntuaciones de las preguntas promediándolas para cada empresa encuestada de forma tal que se obtuviera un rendimiento global por empresa.

TABLA III. COMPONENTES DE LA VARIABLE DE RESPUESTA PARA EL MODELO PROPUESTO

Variable	Preguntas
Rendimiento	1. Calidad de sus productos 2. Eficiencia de los procesos productivos 3. Satisfacción de clientes 4. Rapidez de adaptación a los cambios en el mercado 5. Rapidez de crecimiento de las ventas 6. Rentabilidad 7. Satisfacción de los empleados 8. Grado de absentismo laboral

El modelo propuesto para el análisis es el de regresión lineal múltiple que se detalla a seguir:

$$Yi = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \varepsilon i \qquad (1)$$

Yi = rendimiento promedio
X_1 = Innovación de producto
X_2 = Innovación de proceso
X_3 = Innovación organizacional

IV. RESULTADOS

Para validar las hipótesis planteadas se realizó un análisis de regresión a los datos mediante la herramienta de Mínimos Cuadrados Ordinarios. El modelo probado fue multivariable donde las tres variables explicativas correspondieron a la Innovación de producto (X1), Innovación de procesos (X2) e Innovación organizacional (X3), en el caso de la variable de respuesta fue el Rendimiento promedio. Todos los análisis estadísticos realizados a la muestra se procesaron por medio del paquete estadístico SPSS.

Como primer paso se verificó el nivel de explicación de las variables explicativas sobre la variable de respuesta. Para la muestra estudiada se obtuvo un valor de R cuadrado que a primera vista parece relativamente bajo de 0.161 (ver Tabla). Aunque la magnitud parece baja es bastante bueno para el caso de modelos de las ciencias sociales.

TABLA IV. RESUMEN DEL MODELO

R	R cuadrado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
0.402	0.161	0.75766	2.063

Un segundo análisis realizado fue verificar la significancia global del modelo, el estadístico de prueba de Fisher fue de 25.345 y un p valor mucho menor de 0.0001. Esto indica que, aunque se tiene un R cuadrado bajo el modelo presenta alta significancia global. Por lo tanto, las variables de innovación explican el rendimiento de manera conjunta. La TABLA V presenta los resultados del Análisis de Varianza del modelo (ANOVA).

TABLA V. ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO (ANOVA)

Ítem	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	P valor
Regresión	43.649	3	14.55	25.345	< 0.001
Residuo	226.752	395	0.574		
Total	270.401	398			

Al verificar la significancia individual de los coeficientes de las variables explicativas se puede apreciar que la innovación de producto no presentó significancia estadística de forma individual mientras que las variables innovación de proceso e innovación organizacional fueron altamente significativa. La Tabla presenta dichos resultados.

TABLA VI. SIGNIFICANCIA INDIVIDUAL DE LOS COEFICIENTES

Ítems	Coeficientes	t	P valor	Intervalo al 95 %	
				LI	*LS*
Constante	3.211				
X_1	0.051	0.884	0.377	-0.063	0.166
X_2	0.169	2.458	0.014	0.034	0.305
X_3	0.142	2.156	0.032	0.013	0.271

Por último, se procedió a validar los supuestos del modelo, empezando por la Normalidad de los Residuales. La prueba para determinar normalidad utilizada fue el test

de Shapiro – Wilk, al realizar este test se obtuvo un p valor de 0.697 lo que permite concluir que los residuales siguen una distribución aproximadamente normal (ver Tabla).

TABLA VII. PRUEBAS DE NORMALIDAD PARA RESIDUALES

	Shapiro-Wilk		
Variable	***Estadístico***	***gl***	***P valor***
Residuales	.997	399	.697

Para validar el supuesto de homogeneidad de varianza se hizo una revisión del comportamiento de los residuales y los valores predictivos del modelo. La Fig. 1 muestra que los residuales no presentan algún patrón particular a lo largo de sus respectivos valores predictivos, lo que nos permite concluir que existe homogeneidad de varianza y se cumple con este supuesto.

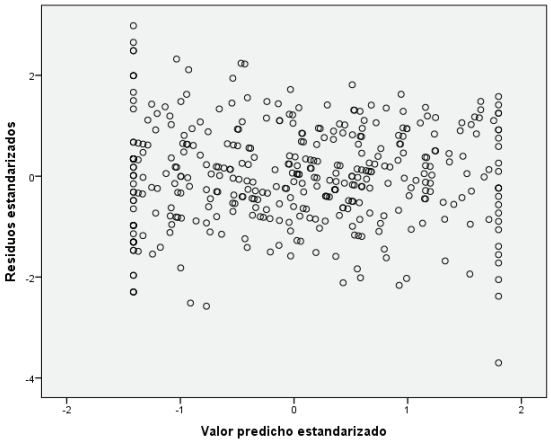


Fig. 1 Diagrama de dispersión de residuales vs valores predictivos

El modelo presentó multicolinealidad, aunque bastante leve (ver TABLA VIII). El valor del Factor de Inflación de la Varianza (FIV) varió entre 2.316 y 3.205, aunque se muestra la existencia de multicolinealidad aún está en valores tolerables, valores mayores a 10 indican una multicolinealidad alta. La existencia de multicolinealidad podría explicar la poca significancia que muestra el Factor de innovación de producto.

TABLA VIII. ESTADÍSTICAS DE COLINEALIDAD DEL MODELO

	Estadísticos	
Ítems	***Tolerancia***	***VIF***
Constante		
X_1	0.432	2.316
X_2	0.312	3.205
X_3	0.341	2.928

Se verificó la no existencia de autocorrelación y el valor del estadístico de Durbin-Watson obtenido fue de 2.063, el cual resulta bastante bueno, al estar entre 1.5 y 2.5, lo que lleva a concluir la "No" existencia de autocorrelación (ver TABLA IV).

V. CONCLUSIONES

La revisión del estado del arte de estudios empíricos realizados por otros países muestra que las innovaciones implementadas en producto, procesos y a la gestión organizacional impactan positivamente el desempeño de las empresas, coincidiendo con el estudio realizado en Panamá, en el contexto de la pandemia por COVID-19. Estas innovaciones permiten probablemente a las mipymes adaptarse a la crisis económica y sanitaria coyuntural y favorecen la generación de ventajas competitivas futuras.

Las pruebas estadísticas aplicadas a través del modelo multivariable considerando como variables explicativas a la Innovación de producto (X1), Innovación de procesos (X2) e Innovación organizacional (X3) y el rendimiento promedio como la variable de respuesta, mostraron un R cuadrado de 0.161, valor considerado aceptable para estudios en el ámbito de las ciencias sociales. En cuanto a la significancia estadística del modelo estadístico global, aplicando la prueba de Fisher fue de 23.345 y un p valor de 0.0001 aunado al R cuadrado presentó significancia estadística de forma individual en las variables innovación de proceso e innovación organizacional, esto infiere que las variables de innovación explican bastante bien el rendimiento del modelo de forma conjunta. La innovación de producto no presentó significancia estadística de forma individual.

Para determinar normalidad se utilizó la prueba estadística test de Shapiro–Wilk, la cual obtuvo un p valor de 0.697 lo que permite concluir que los residuales siguen una distribución aproximadamente normal. Para validar el supuesto de homogeneidad de varianza se hizo una revisión del comportamiento de los residuales y los valores predictivos del modelo demostraron que no presentan un patrón particular a lo largo de sus respectivos valores predictivos, lo que demuestra que existe homogeneidad de varianza y se cumple con este supuesto.

Las empresas incluidas en el estudio reaccionaron de forma positiva y consideran muy importante la incorporación de innovaciones en su modelo de negocios lo que aporta a su permanencia en el mercado, no obstante, las microempresas presentan mayor dificultad para adoptar nuevas herramientas tecnológicas en el corto plazo, ya sea en la mejora de sus productos o servicios y metodologías más eficientes en sus procesos de gestión y dotación de servicios, limitadas principalmente por los costos de inversión.

REFERENCIAS

[1] D. Kawira, "The Effect of Product and Service Innovation on the Performance of Micro, Small and Medium Enterprises in Kenya," J. Mark. Commun., vol. 4, no. 1, pp. 1–13, 2021.

[2] S. Teguh, P. Hartiwi, B. Ridho, S. Bachtiar, A. Synthia, and H. Noor, "Innovation Capability and Sustainable Competitive Advantage: An Entrepreneurial Marketing Perspective," J. Asian Financ. Econ. Bus., vol. 8, no. 5, pp. 127–134, 2021, doi: 10.13106/jafeb.2021.vol8.no5.0127.

[3] B. Takov and M. Velev, "Innovative Activity of Small and Medium-Sized Enterprises," Econ. Altern., vol. 27, no. 4, pp. 580–608, Dec. 2021, doi: 10.37075/ea.2021.4.06.

[4] D. Singh, "Implementation of technology innovation in MSMEs in India: Case study in select firms from Northern region," J. Sci. Technol. Policy Manag., vol. 10, no. 3, pp. 769–792, 2019, doi: 10.1108/JSTPM-06-2018-0065.

[5] J. A. Restrepo-Morales and J. G. Vanegas-López, “The influence of innovation on micro, small and medium sized enterprises in Colombia,” 39th Int. Annu. Conf. Am. Soc. Eng. Manag. ASEM 2018 Bridg. Gap Between Eng. Bus., pp. 725–730, 2018.

[6] A. P. Ndesaulwa and J. Kikula, “The Impact of Innovation on Performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Tanzania: A Review of Empirical Evidence,” J. Bus. Manag. Sci., vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2016, doi: 10.12691/jbms-4-1-1.

[7] J. Rizki, H. K. Suwarsinah, and W. B. Priatna, “the Effect of Adoption of Innovation on the Performance of Micro and Small Entreprises of Dried Fish Processing in Bengkulu City,” J. Manaj. dan Agribisnis, vol. 16, no. 3, pp. 153–164, 2020, doi: 10.17358/jma.16.3.153.

[8] E. S. Soegoto, “Positioning Excellence-Based Model of Business Performance Supported by Market Orientation and Organization Innovation Among The Small and Medium Scale in Binong Jati Knitting Enterprices, Bandung,” 2016.

[9] OCDE, The innovation imperative: Contributing to Productivity, Growth and Well-Being. Paris, 2015.

[10] A. P. Ndesaulwa and J. Kikula, “The Impact of Innovation on Performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Tanzania: A Review of Empirical Evidence,” J. Bus. Manag. Sci., vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2016, doi: 10.12691/jbms-4-1-1.

[11] CEPAL, “América Latina y el Caribe ante la pandemia del COVID-19: Efectos económicos y sociales,” 2020. [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45337/6/S2000264_es.pdf.

[12] AMPYME, “Política nacional de fomento de la micro, pequeña y mediana empresa (mipyme) 2017-2022,” Panamá, 2017. [Online]. Available: http://www.sice.oas.org/SME_CH/PAN/Politica_MIPYME_PAN_2017_2022_s.pdf.

[13] CNC, “Análisis estadístico del sector mype,” Panamá, 2021. [Online]. Available: https://cncpanama.net/bitstream/handle/123456789/996/Producto 1-Análisis Estadistico del sector MYPE-Pub %28002%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[14] P. Angelelli et al., “Respuestas al COVID-19 desde la ciencia, la innovación y el desarrollo productivo,” 2020. doi: 10.18235/0002347.

[15] K. Issau, I. S. K. Acquah, R. I. Gnankob, and Z. Hamidu, “Innovation orientation and performance of small and medium-sized enterprises (SMES) in Ghana: evidence from manufacturing sector,” Innov. Manag. Rev., vol. ahead-of-p, no. ahead-of-print, Jun. 2021, doi: 10.1108/inmr-07-2020-0092.

[16] B. Bigliardi and A. I. Dormio, “An empirical investigation of innovation determinants in food machinery enterprises,” Eur. J. Innov. Manag., vol. 12, no. 2, pp. 223–242, 2009, doi: 10.1108/14601060910953988.

[17] Y. Snihur and J. Wiklund, “Searching for innovation: Product, process, and business model innovations and search behavior in established firms,” Long Range Plann., vol. 52, no. 3, pp. 305–325, 2019, doi: 10.1016/j.lrp.2018.05.003.

[18] H. Blichfeldt and R. Faullant, “Performance effects of digital technology adoption and product & service innovation – A process-industry perspective,” Technovation, vol. 105, no. March, p. 102275, 2021, doi: 10.1016/j.technovation.2021.102275.

[19] S. K. Milewski, K. J. Fernandes, and M. P. Mount, “Exploring technological process innovation from a lifecycle perspective,” Int. J. Oper. Prod. Manag., vol. 35, no. 9, pp. 1312–1331, Sep. 2015, doi: 10.1108/IJOPM-02-2015-0105.

[20] A. Cherrafi and J. Arturo, “Lean, green practices and process innovation: a model for green supply chain performance. Item Type Article Lean, Green Practices and Process Innovation: A Framework for Green Supply Chain Performance.”

[21] OECD and Eurostat, Oslo Manual. 2007.

[22] S. A. Durán and A. E. Briozzo, “Factores determinantes de la innovación en las MIPYMES manufactureras de la Argentina y el Ecuador Determinants of innovation in manufacturing MSMEs of Argentina and Ecuador Fir-Faedpyme International Review.”

[23] S. Choi, H. Jang, and J. Hyun, “Correlation between innovation and performance of construction firms,” Can. J. Civ. Eng., vol. 36, no. 11, pp. 1722–1731, Nov. 2009, doi: 10.1139/L09-070.

[24] G. Maldonado-Guzmán, J. T. Marín-Aguilar, and M. García-Vidales, “Innovation and performance in latin-american small family firms,” Asian Econ. Financ. Rev., vol. 8, no. 7, pp. 986–998, 2018, doi: 10.18488/journal.aefr.2018.87.986.998.

[25] K. Issau, I. S. K. Acquah, R. I. Gnankob, and Z. Hamidu, “Innovation orientation and performance of small and medium-sized enterprises (SMES) in Ghana: evidence from manufacturing sector,” Innov. Manag. Rev., vol. ahead-of-p, no. ahead-of-print, Jun. 2021, doi: 10.1108/inmr-07-2020-0092.

[26] Centro Nacional de Competitividad and Universidad Tecnológica de Panamá, “Impacto Económico de la crisis COVID-19 sobre la MIPYME en Panamá,” Panamá, 2021. [Online]. Available: https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/13428.

The relationship between international tourism arrivals and receipts in the Americas

Yovani Edgar Chávez Rodríguez
Metropolitan University of Education, Science and Technology (UMECIT)
Panama, Republic of Panama
yovani.edgar.chavez.rodriguez.cisa20@ndualumni.org

***Abstract* — Tourism is a social activity that is related to the movement of peoples around the world for a variety of personal, commercial, and educational purposes. While there are different studies on tourism, few have investigated the causality relationship between international tourism arrivals and receipts in the Americas for a considerable extension of time to obtain more realistic results. This research applies simple linear regression analysis to study the bidirectional causality relationship between international tourism arrivals and receipts. This research uses the IBM SPSS Statistics software (version 27) for analysis. Public data from the World Bank Open Data on 17 states of the Americas covers 25 years of data from 1995 to 2019. The conclusion of this research is that while most of the states achieved a significant effect from international tourism arrivals to international tourism receipts and vice versa, only one country in the Americas demonstrated a bidirectional causality relationship without problems of autocorrelation. In that regard, the results show that more international tourism arrivals do not always mean more tourism income. Similarly, more tourism income does not always cause more international tourism arrivals.**

Keywords — Americas, tourism, international tourism arrivals, international tourism receipts.

I. INTRODUCTION

Tourism is a social activity that is related to the movement of peoples around the world for a variety of personal, commercial, and educational purposes. It is an important component of economic growth because it can generate employment, ignite the improvement of facilities, increase tax revenues, and promote worldwide peace [1]. It is recognized as one of the most important growing economic sectors and contributing factors to gross domestic products around the world, causing scholars to forecast that it might surpass other sectors such as mining, banking, automotive manufacturing, and agriculture [2].

Tourism is a valuable area of research because of its connectiveness to different activities and sectors. In that regard, the study of tourism can point out activities that significantly depend on public administration policies and strategies [3]. Likewise, it is estimated that tourism can positively affect international trade and exchange rates [4]. Additionally, tourism is one of the most important sources of economic income, convincing governments to invest in it [5]. Furthermore, because tourism is very lucrative, it can promote employment and economic growth [6].

While extant research has covered tourism, few have analyzed the causality relationship from international tourism arrivals to international tourism receipts and vice versa, making it suitable to fill the knowledge gap in the scientific literature with regard to the Americas. The focus of this research is to study the plausible presence of bidirectional causality between those variables.

Common sense assumes that the more international tourists arrive, the more revenue a country receives and vice versa. Furthermore, while some scholars have explicitly or implicitly disregarded the value of time [7], this research analyzes the relationship between international tourism arrivals and receipts for a considerable extension of time to obtain more realistic results.

II. LITERATURE REVIEW

Few tourism studies have investigated the causality relationship between international tourism arrivals and receipts in the Americas. Notably, a study on the top 10 countries in terms of tourism income found that international tourism arrivals have a small but significant impact on international tourism receipts [8]. Later, some scholars conducted a study on 129 countries and noticed that while there is a positive correlation between international tourism arrivals and receipts, the number of World Heritage Sites also has a significant impact on both variables [9].

Likewise, another study on 11 South African countries found that international tourism arrivals exert significant influence on international tourism receipts but not the other way around [10]. Other scholars who studied tourism in Romania concluded that gross domestic product exerts a significant effect on both international tourism arrivals and receipts [11]. Similarly, a study on 118 countries concluded that information and communication technologies exert a strong and stable influence on international tourism arrivals; however, they do not have a constant impact on international tourism receipts [12].

Also, research on 25 European countries noted that although international tourism arrivals and receipts are important for tourism growth, some countries with high levels of international tourism arrivals have not been able to attract tourists who spend more money during their stays to achieve significant economic benefits from international tourism receipts [13]. Other scholars conducted a study on 150 countries and noted that excelling in international tourism arrivals does not necessarily mean competitiveness in terms of international tourism receipts [14]. Additionally, a study performed in China highlighted that World Heritage Sites have a positive influence on both international tourism arrivals and receipts [15].

As noted, while several studies have analyzed the relationship between international tourism arrivals and receipts in different regions of the world, there is a need to understand their causality relationship in the Americas. For instance, a limited analysis of the Americas hypothesized that countries more dependent on tourism will experience a drop in international tourism receipts because of the COVID-19 pandemic [16]. Likewise, other studies have offered a descriptive analysis of international tourism receipts and arrivals in the Americas and other regions without offering a causality relationship [17].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00017

A. International tourism arrivals

International tourism arrivals are considered as one of the main indicators of sustained economic growth, making a country increasingly dependent on tourism benefits [18]. In that regard, while tourism can create a significant impact on economic growth, its positive effects are stronger at all levels when they are measured using international tourism receipts rather than using international tourism arrivals [19].

Moreover, international tourism arrivals have been credited for their significant benefits. For example, increasing international tourism arrivals can lead to a reduction in poverty [20]. However, scholars have highlighted that international tourism arrivals do not have a significant impact on economic growth in the case of developing countries such as Brazil, Russia, India, and China [21].

On one hand, international tourism arrivals can be affected by endogenous and external factors. For instance, it has been suggested that economic crises, political instability, pandemics, and increasing oil prices can negatively affect international tourism arrivals [22]. Similarly, other scholars concluded that economic policy uncertainty coming from economic crises, financial emergencies, epidemics, and policy changes can reduce international tourism arrivals in the long run [23]. For instance, events such as terrorist acts can temporarily affect international tourism arrivals [24]. Also, terrorist attacks in neighboring countries can have spillover effects on international tourism arrivals [25]. As a result, governments should improve the safety of tourist sites to increase international tourism arrivals [26].

Factors such as economic size and shared boundaries can also increase a country's international tourism arrivals [27]. Similarly, an increase in tourism tax can reduce international tourism arrivals [28]. Likewise, oil price volatility has a significant effect on international tourism arrivals [29]. Additionally, although external factors can affect international tourism arrivals, their effects tend to be temporary in the long run [30]. Moreover, a study on small island countries located in the Caribbean and Pacific Ocean noted that international tourism arrivals are closely related to political stability, accessibility to tourist destinations, weather conditions, geographical proximities, and economic levels of countries of origin [31].

However, a study suggested that endogenous rather than external factors influence international tourism arrivals the most, which underscores the need to improve endogenous factors such as hotel infrastructure, better deals with airlines from emerging countries of origins, promoting policy dynamism, and designing a clear tourist identity [32]. To reiterate, tourism can be affected by both endogenous and external factors [33].

In that regard, transport infrastructure such as railways and highways can significantly influence the development of international tourism arrivals [34]. For instance, a high-speed rail system can increase international tourism arrivals, which enables authorities to promote connectivity with important tourist destinations and boost tourist growth using this kind of infrastructure [35].

Notably, although their effects can be volatile, the income and exchange rate significantly influence international tourism arrivals [36]. Another study concluded that the exchange rate will significantly increase international tourism arrivals [37]. Additionally, the income per capita can positively influence international tourism arrivals per capita, which highlights the importance of high-income tourist activities such as scuba diving, yacht tourism, trekking, birdwatching, and the like [38]. Likewise, scholars have noted unidirectional causality from foreign direct investment to international tourism arrivals [39].

An increase in international tourism arrivals is also related to seasonal periods [40]. With that in mind, governments should improve accommodation capacities, attract adequate human resources employees, enhance infrastructure, and plan appropriate promotional campaigns to increase international tourism arrivals [41]. Because tourism can be susceptible to social changes and political events, online news about a destination can increase international tourism arrivals [42].

Likewise, the adequate use of information, communication, and technology as well as tourism marketing campaigns of countries with bilateral trade can significantly increase international tourism arrivals [43]. For instance, a study noted that using Google Trends data is a useful way to accurately predict international tourism arrivals [44].

On the other hand, international tourism arrivals can exert different effects on several factors. For instance, they can significantly increase house prices in the short and long run, which underscores the tendency of tourists to buy residential properties and the subsequent need to promote policies that strengthen the housing and real estate market in a country [45]. Additionally, international tourism arrivals can contribute to air pollution, which highlights the importance of technological innovation, energy, and environmental policies to reduce the negative impacts of tourism [46].

B. International tourism receipts

Although many countries are interested in international tourism arrivals and receipts, the latter have greater importance because of their tangible economic impact [47]. While international tourism receipts can exert several effects, they can also be receptive to different causes. For example, tourist revenues can affect the gross domestic product and economic growth [48]. Similarly, scholars noted that international tourism receipts can be influenced by the gross domestic product per capita and the real exchange rate in the long run [49]. However, economic growth can also affect international tourism receipts [50].

Another study stated that although international tourism receipts can be related to the gross domestic product and the closeness to economic hubs, they obtain fluctuating results among different countries [51]. Also, because of their high connectivity, international tourism receipts can be affected by exchange rates, exports, economic sanctions, trade relationships, and geopolitical risk [52]. Nonetheless, international tourism receipts help guarantee the development and sustainability of the tourism industry [53]. In that regard, improvements on infrastructure innovation can increase international tourism receipts [54].

Research has demonstrated bidirectional causality between international tourism receipts and the gross domestic product [55]. One study noted a long-term relationship between international tourism arrivals and receipts, enabling authorities increase international tourism receipts by considering international tourism arrivals and the improvement of tourism services [56]. On the other hand, a

study on Africa highlighted that an increase in international tourism receipts does not necessarily mean a reduction of poverty [57].

Moreover, geopolitical risk is a significant predictor of international tourism arrivals and receipts, which highlights the importance of peace and stability [58]. Notably, insecurity and corruption can negatively affect international tourism arrivals and receipts [59]. Additionally, economic policy uncertainty can significantly affect international tourism receipts [60]. For instance, a crisis can negatively affect both international tourism arrivals and receipts [61]. However, while political instability can negatively affect international tourism receipts, the tourism industry can recover faster than the overall economy [62].

III. Methods

While there are different studies on tourism, few have investigated the causality relationship between international tourism arrivals and receipts in the Americas for a considerable extension of time to obtain more realistic results.

This research applies simple linear regression analysis for each state to study the existence of bidirectional causality between international tourism arrivals and receipts in the Americas. This research uses the IBM SPSS Statistics software (version 27) for analysis. In that regard, public data from the World Bank Open Data on 17 states of the Americas covers 25 years of data from 1995 to 2019 [63].

Although the Americas have 35 sovereign states and several dependent states, only 17 states had complete and public data about international tourism arrivals and receipts in the span of 25 years: Aruba (Kingdom of the Netherlands), Argentina, the Bahamas, Bolivia, Brazil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Curacao (Kingdom of the Netherlands), the Cayman Islands (United Kingdom), Ecuador, Guatemala, Mexico, Panama, Puerto Rico (United States), Trinidad and Tobago, and the United States.

In this research, international tourism arrivals refer to the number of international tourists who travel to a country that is not their usual residency for a period of less than 12 months to do activities in the visited country that have nothing to do with remuneration [64]. On the other hand, international tourism receipts refer to the amount of money (measured in U.S. dollars) spent by international tourists in the visited country in terms of payments for international transportation, goods, and services [65].

IV. Results

According to the descriptive analysis, while the United States, Mexico, Brazil, the Bahamas, and Argentina have a mean that ranks them in the top five positions in terms of international tourism arrivals, Guatemala, Ecuador, Curacao, Bolivia, and Trinidad and Tobago are in the lowest positions. For instance, there is a notable difference between the United States, which had an average of 128 million international tourists, and Trinidad and Tobago, with a mean of 465,000 international tourists, in a span of 25 years (Table I).

TABLE I. INTERNATIONAL TOURISM ARRIVALS

State	N	Mean	Std. Deviation
United States	25	128,208,250.60	50,021,742.00
Mexico	25	92,247,720.00	8,469,957.00
Brazil	25	5,056,520.00	1,227,110.00
Bahamas	25	4,971,080.00	1,142,655.00
Argentina	25	4,726,200.00	1,853,389.00
Puerto Rico	25	4,599,240.00	367,713.10
Cuba	25	2,470,400.00	1,083,682.00
Costa Rica	25	2,102,240.00	802,799.30
Colombia	25	2,031,520.00	1,273,890.00
Cayman Islands	25	1,802,880.00	368,638.20
Panama	25	1,443,560.00	776,697.50
Aruba	25	1,379,000.00	326,142.90
Guatemala	25	1,344,720.00	573,367.70
Ecuador	25	1,073,880.00	553,797.60
Curacao	25	728,960.00	286,725.40
Bolivia	25	622,320.00	286,548.10
Trinidad and Tobago	25	465,120.00	66,294.37

Quite similar to the situation in terms of international tourism arrivals, the United States, Mexico, Brazil, Argentina, and Colombia get more revenue from tourism thanks to international tourism receipts. However, Guatemala, the Cayman Islands, Trinidad and Tobago, Bolivia, and Curacao are the lowest ranking countries that benefit the most from tourism revenue. It is worth noting that while the United States capitalized on the arrival of international tourists with an average of 153.8 billion dollars, Curacao only got an average of 413,800 dollars from 1995 to 2019 (Table II).

TABLE II. INTERNATIONAL TOURISM RECEIPTS

State	N	Mean	Std. Deviation
United States	25	153,809,080,000.00	54,778,842,455.00
Mexico	25	13,471,240,000.00	5,263,936,979.00
Brazil	25	4,318,280,000.00	2,250,996,030.00
Argentina	25	4,251,760,000.00	1,399,639,069.00
Colombia	25	3,097,040,000.00	1,933,467,297.00
Puerto Rico	25	3,002,360,000.00	631,394,678.50
Panama	25	2,794,760,000.00	2,487,869,508.00
Costa Rica	25	2,303,400,000.00	1,059,449,661.00
Cuba	25	2,270,680,000.00	534,420,848.50
Bahamas	25	2,173,200,000.00	699,542,588.70
Aruba	25	1,218,343,999.02	441,209,816.20
Ecuador	25	888,200,000.00	639,595,445.10

Guatemala	25	839,460,000.00	361,073,624.50
Cayman Islands	25	560,880,000.00	152,822,969.50
Trinidad and Tobago	25	546,120,000.00	187,129,705.50
Bolivia	25	416,960,000.00	303,261,092.10
Curacao	25	413,840,000.00	213,699,298.10

Although correlation does not mean causality, correlation is important because it can measure the degree of relationship, connection, and closeness between international tourism arrivals and international tourism receipts to make predictions and reduce uncertainty.

Except for Mexico, the states have significant Pearson correlation coefficients in the relationship between international tourism arrivals and receipts (Table III).

TABLE III. CORRELATIONS

International Tourism Arrivals (ITA)	International Tourism Receipts (ITR)	P-Value	Result
Aruba (ITA)	Aruba (ITR)	0.001**	Confirmed
Argentina (ITA)	Argentina (ITR)	0.001**	Confirmed
Bahamas (ITA)	Bahamas (ITR)	0.001**	Confirmed
Bolivia (ITA)	Bolivia (ITR)	0.001**	Confirmed
Brazil (ITA)	Brazil (ITR)	0.001**	Confirmed
Colombia (ITA)	Colombia (ITR)	0.001**	Confirmed
Costa Rica (ITA)	Costa Rica (ITR)	0.001**	Confirmed
Cuba (ITA)	Cuba (ITR)	0.001**	Confirmed
Curacao (ITA)	Curacao (ITR)	0.001**	Confirmed
Cayman Islands (ITA)	Cayman Islands (ITR)	0.002**	Confirmed
Ecuador (ITA)	Ecuador (ITR)	0.001**	Confirmed
Guatemala (ITA)	Guatemala (ITR)	0.001**	Confirmed
Mexico (ITA)	Mexico (ITR)	0.997	Not Confirmed
Panama (ITA)	Panama (ITR)	0.001**	Confirmed
Puerto Rico (ITA)	Puerto Rico (ITR)	0.002**	Confirmed
Trinidad and Tobago (ITA)	Trinidad and Tobago (ITR)	0.002**	Confirmed
United States (ITA)	United States (ITR)	0.001**	Confirmed

With the exception of Mexico, all the countries had significant relationships from international tourism arrivals to receipts and vice versa. However, the Durbin–Watson test statistic measured in both ways signals the presence of autocorrelation. Values from 1.5 to 2.5 for the Durbin–Watson test indicate no problems with serial correlation [66]. If not detected, serial correlation can be a problem because it can mislead researchers to believe that there is a significant relationship between international tourism arrivals and international tourism receipts when in reality there is not.

For an alpha equaling 0.05 as well as 25 years of data, the critical values in the Durbin–Watson test range from 1.29 to 1.45 [67]. Consequently, Ecuador is the only country with a confirmed causal relationship from international tourism arrivals to receipts and vice versa from 1995 to 2019 (Table IV).

TABLE IV. LINEAR REGRESION (ITA–ITR AND ITR–ITA)

State	R Square Change	F (1,23) Change	Sig. F Change	Durbin–Watson (ITA–ITR)	Durbin–Watson (ITR–ITA)
Aruba	0.943	382.098	0.000**	1	1
Argentina	0.875	161.456	0.000**	0.8	0.7
Bahamas	0.800	92.161	0.000**	0.4	0.4
Bolivia	0.967	668.509	0.000**	0.6	0.6
Brazil	0.641	41.110	0.000**	0.4	0.5
Colombia	0.911	236.032	0.000**	1	1
Costa Rica	0.970	731.106	0.000**	0.9	0.8
Cuba	0.819	104.191	0.000**	0.5	0.4
Curacao	0.884	174.996	0.000**	0.6	0.6
Cayman Islands	0.359	12.8940	0.002**	0.3	0.3
Ecuador	0.95	438.514	0.000**	1.5**	1.6**
Guatemala	0.832	114.000	0.000**	0.4	0.4
Mexico	0.000	0.000	0.997	0.1	0.3
Panama	0.924	278.602	0.000**	0.3	0.3
Puerto Rico	0.355	12.661	0.002**	0.1	1
Trinidad and Tobago	0.357	12.744	0.002**	0.4	0.5
United States	0.64	40.945	0.000**	0.4	0.6

V. MANAGERIAL IMPLICATIONS

The case of Ecuador signals a conclusive bidirectional causality relationship between international tourism arrivals and receipts. This suggests that this country has been able to capitalize on international tourism arrivals and receipts. In other words, more international tourism arrivals translate into more revenue for the country. Also, more international tourism receipts mean more revenue for the tourism industry, which creates a robust tourism industry that can attract more international tourism arrivals.

This situation highlights the need to attract high-income tourism activities such as scuba diving, yacht tourism, trekking, bird watching, and so on [68]. By understanding international tourism arrivals in terms of their seasonality and consistency, authorities can design proper advertising strategies to promote high- and low-profile tourist sites [69]. In this regard, structural factors such as holidays and cultural events can contribute to the seasonality of tourism, causing the design of strategies to reduce this condition [70]. As a result, it is important for the government to identify potentially profitable tourist sites [71].

Moreover, governments can conduct research on the characteristics, preferences, and culture of a country of origin to design adequate tourist events and attractions that produce an increase in international tourism arrivals [72]. It is recommended that countries offer attractive tourist packages,

stabilize their exchange rates, and reduce transportation costs to increase international tourism arrivals during peak tourist seasons [73].

Understanding the importance of international tourism arrivals and receipts is very crucial for the business and governmental sectors. For example, international tourism arrivals and receipts can reduce income inequalities as they can improve the living conditions of the destitute [74]. In that regard, political leaders can find that worldwide economic crises and global epidemics can negatively affect the tourist industry [75]. For instance, epidemics such as SARS in 2002, H1N1 in 2009, MERS in 2012, and COVID-19 in 2019 have caused declines in international tourism arrivals in many parts of the world [76].

However, a study from 1995 to 2018 on 221 countries found that in general, the degree of interconnectedness among countries and regions related to international tourism arrivals has been steadily increasing despite tourism growth being sporadically affected by crisis events such as the September 11 attacks in 2001 and the financial crisis in 2008, among others [77]. Additionally, there is bidirectional causality between international tourism arrivals and trade openness, which raises important considerations for policymakers in terms of competitive and sustainable international tourism markets [78].

VI. Conclusion

Tourism is a social activity that is related to the movement of peoples around the world for a variety of personal, commercial, and educational purposes. While there are different studies on tourism, few have investigated the causality relationship between international tourism arrivals and receipts in the Americas for a considerable extension of time to obtain more realistic results.

The conclusion of this research is that while most of the states achieved a significant effect from international tourism arrivals to international tourism receipts and vice versa, only one country in the Americas demonstrated a bidirectional causality relationship without problems of autocorrelation. In other words, the results show that more international tourism arrivals do not always mean more tourism income. Similarly, more tourism income does not always cause more international tourism arrivals.

In that regard, Ecuador was the only country demonstrating such a relationship without autocorrelation problems. These results are partially in line with those of a study on the top 10 countries in terms of tourism that noted that international tourism arrivals have a positive effect on international tourism receipts [79]. Furthermore, a study on the South African region noted the significant influence of international tourism arrivals on receipts but not the other way around [80].

However, 15 states (Aruba, Argentina, the Bahamas, Bolivia, Brazil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Curacao, the Cayman Islands, Guatemala, Panama, Puerto Rico, Trinidad and Tobago, and the United States) did not achieve conclusive causal relationships between international tourism arrivals and receipts given the presence of autocorrelation. In other words, because international tourism arrivals and receipts have been steadily growing from 1995 to 2019, those variables are expected to grow in the years to come. As a result, Ecuador was the only state that demonstrated a bidirectional causality relationship.

Notably, only Mexico showed neither a significant correlation nor a bidirectional causality relationship between international tourism arrivals and receipts, which opens the door to further research on this topic. In that regard, there can be cases where an increase in international tourism arrivals does not mean a significant increase in international tourism receipts because while the former can increase, the latter can grow at different speeds or even decrease in some countries [81]. This has been corroborated in a study on European countries from 1995 to 2016 that found only a significant relationship between international tourism arrivals and receipts in the long run [82].

Further studies should be conducted to analyze the interaction of international tourism arrivals and international tourism receipts with other variables such as gross domestic product, foreign direct investment, marketing, exchange rates, human capital, and technology.

References

[1] O. Adeola, N. Boso, and O. Evans, "Drivers of International Tourism Demand in Africa," Business Economics 53, no. 1 (February 1, 2018): 25–36, https://doi.org/10.1057/S11369-017-0051-3.

[2] A. Hadood, R. Saleh, and K. Emgeg, "Threshold Effect of Information Technology Infrastructure on Tourism Sector Development: Evidence From Top 10 African Destinations," Geojournal of Tourism and Geosites 39 (2021): 1336–45, https://doi.org/10.30892/GTG.394SPL03-776.

[3] J. Durán, P. Cárdenas, and J. Pulido, "Tourists' Willingness to Pay to Improve Sustainability and Experience at Destination," Journal of Destination Marketing and Management 19 (March 1, 2021), https://doi.org/10.1016/J.JDMM.2020.100540.

[4] S. Narayan, P. Narayan, and L. Tobing, "Has Tourism Influenced Indonesia's Current Account?," Economic Analysis and Policy 69 (March 1, 2021): 225–37, https://doi.org/10.1016/J.EAP.2020.12.009.

[5] Y. Yalcin, C. Arikan, and N. Kose, "The Asymmetric Impact of Real Exchange Rate on Tourism Demand," European Journal of Comparative Economics 18, no. 2 (2021): 251–66, https://doi.org/10.25428/1824-2979/005.

[6] S. Kadam, S. Bhatt, and C. Prajapati, "The Study on Political Branding as Catalyst in Tourism Marketing with an Indian Perspective," Research Horizons 7 (2017): 194–200, https://eds-s-ebscohost-com.nduezproxy.idm.oclc.org/eds/detail/detail?vid=5&sid=a9487d49-6bf3-4628-b393-e2ac92a60647%40redis&bdata=JkF1dGhUeXBlPWlwLHVybCx1aWQmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=138606095&db=aph.

[7] Y. Griep, I. Vranjes, J. Kraak, L. Dudda, Y. Li, "Start Small, Not Random: Why Does Justifying Your Time-Lag Matter?," The Spanish Journal of Psychology 24, no. 2 (September 13, 2021): 1–6, https://doi.org/10.1017/SJP.2021.42.

[8] E. Dücan and A. Bozkurt, "International Tourist Arrivals by Region of Origin and Tourism Receipts: A Panel Data Analysis," Research Journal of Politics, Economics & Management / Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Arastirmalari Dergisi 5, no. 1 (2017): 33–46, https://dergipark.org.tr/en/pub/seyad/issue/53372/709606.

[9] Z. Bacsi and É. Tóth, "World Heritage Sites as Soft Tourism Destinations – Their Impacts on International Arrivals and Tourism Receipts," Bulletin of Geography. Socio-Economic Series 45, no. 45 (2019): 25–44, https://doi.org/10.2478/BOG-2019-0022.

[10] S. Sarpong, M. Bein, B. Gyamfi, and S. Sarkodie, "The Impact of Tourism Arrivals, Tourism Receipts and Renewable Energy Consumption on Quality of Life: A Panel Study of Southern African Region," Heliyon 6, no. 11 (November 1, 2020), https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E05351.

[11] A. Badulescu, D. Badulescu, R. Simut, and S. Dzitac, "Tourism – Economic Growth Nexus. The Case of Romania," Technological and Economic Development of Economy 26, no. 4 (June 12, 2020): 867–84, https://doi.org/10.3846/TEDE.2020.12532.

[12] L. Chieng, C. Ping, W. Wenmin, and W. Xing, "The Impacts of ICTs on Tourism Development: International Evidence Based on a Panel Quantile Approach," Information Technology and Tourism 23, no. 4

(December 1, 2021): 509–47, https://doi.org/10.1007/S40558-021-00215-4.

[13] H. Rudež, "Is International Tourism Growth Supported by Increased Tourism Receipts?," Academica Turistica 13, no. 2 (December 1, 2020): 153–56, https://doi.org/10.26493/2335-4194.13.153-156.

[14] T. Dogru, C. Suess, and E. Sirakaya, "Why Do Some Countries Prosper More in Tourism than Others? Global Competitiveness of Tourism Development," Journal of Hospitality and Tourism Research 45, no. 1 (January 1, 2021): 215–56, https://doi.org/10.1177/1096348020911706.

[15] Y. Lin, M. Chen, B. Lin, S. Tseng, and C. Su, "Nonlinear Impact of World Heritage Sites on China's Tourism Expansion," Tourism Economics 27, no. 4 (June 1, 2021): 795–819, https://doi.org/10.1177/1354816620904886.

[16] C. Gaffney and B. Eeckels, "Covid-19 and Tourism Risk in the Americas," Journal of Latin American Geography 19, no. 3 (2020): 308–13, https://doi.org/10.1353/LAG.2020.0054.

[17] G. Tovmasyan, "Tourism Development Trends in the World," European Journal of Economic Studies 17, no. 3 (September 13, 2016): 429–34, https://doi.org/10.13187/ES.2016.17.429; Adrian Scutariu, "The Place of E.U. Tourism within the Frame of World Tourism," USV Annals of Economics & Public Administration 13, no. 2 (2013): 48–55, https://ideas.repec.org/a/scm/usvaep/v13y2013i2(18)p48-55.html.

[18] J. Saha, S. Haldar, S. Bhattacharya, and S. Paul, "Tourism in Retrospect of COVID-19 on Global Perspective Using Analytical Hierarchy Process," Spatial Information Research 29, no. 6 (December 1, 2021): 981–95, https://doi.org/10.1007/S41324-021-00407-4.

[19] H. Scarlett, "Tourism Recovery and the Economic Impact: A Panel Assessment," Research in Globalization 3 (December 1, 2021), https://doi.org/10.1016/J.RESGLO.2021.100044.

[20] N. Odhiambo, "Tourism Development and Poverty Alleviation in Sub-Saharan African Countries: An Empirical Investigation," Development Studies Research 8, no. 1 (2021): 396–406, https://doi.org/10.1080/21665095.2021.2007782.

[21] G. Usmani, V. Akram, and B. Praveen, "Tourist Arrivals, International Tourist Expenditure, and Economic Growth in BRIC Countries," Journal of Public Affairs 21, no. 2 (May 1, 2021), https://doi.org/10.1002/PA.2202.

[22] K. Chokethaworn, T. Sriwichailamphan, S. Sriboonchitta, C. Chaiboonsri, J. Sriboonjit, and P. Chaitip, "International Tourist Arrivasl in Thailand: Forecasting with ARFIMA-FIGARCH Approach," Annals of the University of Petrosani Economics 10, no. 2 (2010): 75–84, https://web.p.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=15825949&AN=62650959&h=Qk26BKpfyO5RuzSf4TsHuoKNWgA1v0sVr5GqOrPyx%2FgTrHsHMVmN62QXURa51gqLnRCsrU3MEXtNqyZRQp4z9w%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=E.

[23] S. Ongan and G. Gozgor, "Tourism Demand Analysis: The Impact of the Economic Policy Uncertainty on the Arrival of Japanese Tourists to the USA," International Journal of Tourism Research 20, no. 3 (May 1, 2018): 308–16, https://doi.org/10.1002/JTR.2182.

[24] R. Smyth, I. Nielsen, and V. Mishra, "'I've Been to Bali Too' (and I Will Be Going Back): Are Terrorist Shocks to Bali's Tourist Arrivals Permanent or Transitory?," Applied Economics 41, no. 11 (2009): 1367–78, https://doi.org/10.1080/00036840601019356.

[25] C. Seabra, P. Reis, and J. Abrantes, "The Influence of Terrorism in Tourism Arrivals: A Longitudinal Approach in a Mediterranean Country," Annals of Tourism Research 80 (January 1, 2020), https://doi.org/10.1016/J.ANNALS.2019.102811.

[26] Y. Purwomarwanto and J. Ramachandran, "Performance of Tourism Sector with Regard to the Global Crisis--a Comparative Study between Indonesia, Malaysia and Singapore," Journal of Developing Areas 49, no. 4 (2015): 325–39, https://www.jstor.org/stable/24737389.

[27] R. Salahodjaev, N. Safarova, and N. Usmanova, "Determinants of Tourism Arrivals to Uzbekistan: Evidence from Dyadic Data," Tourism Review International 24, no. 4 (2020): 251–55, https://doi.org/10.3727/154427220X15990732245718.

[28] F. Adedoyin, N. Seetaram, M. Disegna, and G. Filis, "The Effect of Tourism Taxation on International Arrivals to a Small Tourism-Dependent Economy," Journal of Travel Research, 2021, https://doi.org/10.1177/00472875211053658.

[29] H. Hassani, M. Ghodsi, X. Huang, and E. Silva, "Is There a Causal Relationship between Oil Prices and Tourist Arrivals?," Journal of Applied Statistics 48, no. 1 (2021): 191–202, https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1720625.

[30] C. Lee, "Are Tourist Arrivals Stationary? Evidence from Singapore," International Journal of Tourism Research 11, no. 4 (2009): 409–14, https://doi.org/10.1002/JTR.708.

[31] P. Vítová, J. Harmáček, and Z. Opršal, "Determinants of Tourism Flows in Small Island Developing States (SIDS)," Island Studies Journal 14, no. 2 (November 1, 2019): 3–22, https://doi.org/10.24043/ISJ.90.

[32] A. Charles, O. Darné, and J. Hoarau, "How Resilient Is La Réunion in Terms of International Tourism Attractiveness: An Assessment from Unit Root Tests with Structural Breaks from 1981-2015," Applied Economics 51, no. 24 (May 21, 2019): 2639–53, https://doi.org/10.1080/00036846.2018.1558349.

[33] I. Bentum, "Drivers of International Business and Holiday Tourism in Ghana: A Nonparametric Approach," International Journal of Economics & Business Studies 4, no. 1/2 (2014): 25–42, https://web.s.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=09743456&AN=115156147&h=v%2FgvhqbpHQsHXt42bVzWdGzTpe92NUUxgEUUnC7PdMdblmiNNzkuxGJct0ZrIZRZKvAMpH3vwp74QN9GDf%2FMlw%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLoca.

[34] Z. Wang, "Factors That Influence the Growth of Chinese Domestic Tourism Arrivals (1985-2007) - an Empirical Research Based on the VAR Model," Asia Pacific Journal of Tourism Research 15, no. 4 (December 2010): 449–59, https://doi.org/10.1080/10941665.2010.520947.

[35] Y. Gao, W. Su, and K. Wang, "Does High-Speed Rail Boost Tourism Growth? New Evidence from China," Tourism Management 72 (June 1, 2019): 220–31, https://doi.org/10.1016/J.TOURMAN.2018.12.003.

[36] T. Hui and C. Yuen, "An Econometric Study on Japanese Tourist Arrivals in British Columbia and Its Implications," Service Industries Journal 18, no. 4 (1998): 38–50, https://doi.org/10.1080/02642069800000040.

[37] D. Williams and A. Spencer, "Advertising and Tourist Arrivals: Evidence from Jamaica," Tourism and Hospitality Research 10, no. 4 (2010): 359–66, https://doi.org/10.1057/THR.2010.13.

[38] V. Yorucu and O. Mehmet, "The Bounds-Test Approach for Co-Integration between International Tourist Arrivals, per Capita Income and Cost of Living: The Case of All Cyprus," Applied Economics Letters 18, no. 14 (September 2011): 1327–31, https://doi.org/10.1080/13504851.2010.537616.

[39] L. ThiMinh, H. LeMinh, and P. ThiPhi, "The Relationship between International Tourist Arrivales and Foreign Direct Investment: A Granger Causality Analysis," Acta Oeconomica Pragensia 25, no. 4 (August 1, 2017): 3–12, https://doi.org/10.18267/J.AOP.586.

[40] L. Gil, J. Ruiz, and R. Ayestarán, "UK Tourism Arrivals and Departures: Seasonality, Persistence and Time Trends," Applied Economics 52, no. 46 (October 1, 2020): 5077–87, https://doi.org/10.1080/00036846.2020.1752904.

[41] S. Thushara, J. Su, and J. Bandara, "Forecasting International Tourist Arrivals in Formulating Tourism Strategies and Planning: The Case of Sri Lanka," Cogent Economics and Finance 7, no. 1 (January 1, 2019): 1–10, https://doi.org/10.1080/23322039.2019.1699884.

[42] E. Park, J. Park, and M. Hu, "Tourism Demand Forecasting with Online News Data Mining," Annals of Tourism Research 90 (September 1, 2021), https://doi.org/10.1016/J.ANNALS.2021.103273.

[43] G. Agiomirgianakis, G. Bertsatos, and N. Tsounis, "Asymmetric Responses in the Tourism Demand Function," Journal of Economic Asymmetries 18 (November 1, 2018), https://doi.org/10.1016/J.JECA.2018.E00103.

[44] W. Höpken, T. Eberle, M. Fuchs, and M. Lexhagen, "Improving Tourist Arrival Prediction: A Big Data and Artificial Neural Network Approach," Journal of Travel Research 60, no. 5 (May 1, 2021): 998–1017, https://doi.org/10.1177/0047287520921244.

[45] A. Alola, S. Asongu, and U. Alola, "House Prices and Tourism Development in Cyprus: A Contemporary Perspective," Journal of Public Affairs 20, no. 2 (May 1, 2020), https://doi.org/10.1002/PA.2035.

[46] S. Yıldırım, D. Yıldırım, K. Aydın, and F. Erdoğan, "Regime-Dependent Effect of Tourism on Carbon Emissions in the Mediterranean Countries," Environmental Science and Pollution

Research 28, no. 39 (October 1, 2021): 54766–80, https://doi.org/10.1007/S11356-021-14391-7.

[47] U. Al-Mulali, S. Solarin, A. Andargoli, and H. Gholipour, "Digital Adoption and Its Impact on Tourism Arrivals and Receipts," Anatolia 32, no. 2 (2021): 337–39, https://doi.org/10.1080/13032917.2020.1856692.

[48] A. Trajkov, C. Andreeski, and J. Biljan, "Measuring the Impact of the COVID-19 Crisis on the Foreign Tourist Receipts," Economic Themes 60, no. 1 (2022): 1–19, https://doi.org/10.2478/ethemes-2022-0001.

[49] M. Sibanda, H. Ndlela, and B. Nomlala, "Drivers of International Tourism in South Africa: Evidence from Econometric Analysis," Journal of Global Business & Technology 16, no. 2 (2020): 71–84, https://www.proquest.com/docview/2479492139?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true.

[50] W. Xia, B. Doğan, U. Shahzad, F. Adedoyin, A. Popoola, and M. Bashir, "An Empirical Investigation of Tourism-Led Growth Hypothesis in the European Countries: Evidence from Augmented Mean Group Estimator," Portuguese Economic Journal 21, no. 2 (May 1, 2022): 239–66, https://doi.org/10.1007/S10258-021-00193-9; A. Mushtaq and K. Zaman, "Impact of Macroeconomic Factors on Tourism Receipts: Evidence from SAARC Region," European Economics Letters 2, no. 2 (2013): 38–43, https://ideas.repec.org/a/ris/eueclt/0012.html; M. Bouzahzah and Y. Menyari, "International Tourism and Economic Growth: The Case of Morocco and Tunisia," The Journal of North African Studies 18, no. 4 (2013): 592–607, https://doi.org/10.1080/13629387.2013.836321.

[51] F. Balli and R. Louis, "Modelling the Tourism Receipt's Volatility," Applied Economics Letters 22, no. 2 (January 22, 2015): 110–15, https://doi.org/10.1080/13504851.2014.929616.

[52] U. Violet, S. Cop, and A. Adewale, "The Spillover Effects of Tourism Receipts, Political Risk, Real Exchange Rate, and Trade Indicators in Turkey," International Journal of Tourism Research 21, no. 6 (November 1, 2019): 813–23, https://doi.org/10.1002/JTR.2307.

[53] S. Yap, N. Ayob, and C. Puah, "Event Tourism Demand and Selected Macroeconomic Variables: An Econometrics View of the Long-Run and Short-Run Relationships," International Journal of Business & Society 21, no. 1 (2020): 183–96, https://www.researchgate.net/publication/351236267_Event_Tourism_Demand_and_Selected_Macroeconomic_Variables_An_Econometrics_View_of_the_Long-Run_and_Short-Run_Relationships.

[54] B. Gavurova, J. Belas, K. Valaskova, M. Rigelsky, and V. Ivankova, "Relations between Infrastructure Innovations and Tourism Spending in Developed Countries: A Macroeconomic Perspective," Technological and Economic Development of Economy 27, no. 5 (August 18, 2021): 1072–94, https://doi.org/10.3846/TEDE.2021.15361.

[55] M. Balcilar, V. Eyden, R. Inglesi, and R. Gupta, "Time-Varying Linkages between Tourism Receipts and Economic Growth in South Africa," Applied Economics 46, no. 36 (December 19, 2014): 4381–98, https://doi.org/10.1080/00036846.2014.957445.

[56] J. Hou, P. Huang, and D. Huang, "A Unit Root Test for Two Time Series in China's Tourism Industry," The Chinese Economy 39, no. 6 (December 2006): 39–48, https://doi.org/10.2753/CES1097-1475390603.

[57] M. Saayman, R. Rossouw, and W. Krugell, "The Impact of Tourism on Poverty in South Africa," Development Southern Africa 29, no. 3 (September 2012): 462–87, https://doi.org/10.1080/0376835X.2012.706041.

[58] G. Olasehinde, C. Lee, and S. Akadiri, "Geopolitical Risk and Tourism: Evidence from Dynamic Heterogeneous Panel Models," International Journal of Tourism Research 23, no. 1 (January 1, 2021): 26–38, https://doi.org/10.1002/JTR.2389.

[59] A. Uju, A. Alola, T. Avci, and A. Ozturen, "Impact of Corruption and Insurgency on Tourism Performance: A Case of a Developing Country," International Journal of Hospitality and Tourism Administration 22, no. 4 (2021): 412–28, https://doi.org/10.1080/15256480.2019.1650686.

[60] K. Istiak, "Risk, Uncertainty and the Tourism Sector of North Africa," African Development Review 33, no. 2 (June 1, 2021): 329–42, https://doi.org/10.1111/1467-8268.12574.

[61] P. Singh, "The Impact of Covid-19 on Tourism: An Analysis of Travel Behavior and Preferences of Indian Travelers," IUP Journal of Marketing Management 20, no. 4 (2021): 29–43, https://www.proquest.com/openview/a0d5cc80f24962043ef7cfa960d8d499/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54464.

[62] Y. Morakabati, "A Question of Confidence. Is Tourism as Vulnerable to Civil Unrest as We Think? A Comparative Analysis of the Impact of Arab Spring on Total Reserves and Tourism Receipts," International Journal of Tourism Research 22, no. 2 (March 1, 2020): 252–65, https://doi.org/10.1002/JTR.2333.

[63] The World Bank, "International Tourism, Number of Arrivals," The World Bank Open Data, 2022, https://data.worldbank.org/indicator/ST.INT.ARVL; The World Bank, "International Tourism, Receipts (Current US$)," DataBank, 2022, https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/ST.INT.RCPT.CD.

[64] The World Bank, "International Tourism, Number of Arrivals," DataBank, 2022, https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/ST.INT.ARVL.

[65] The World Bank, "International Tourism, Receipts (Current US$)," Data Bank, 2022, https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/ST.INT.RCPT.CD.

[66] W. Kenton, "Durbin Watson Statistic Definition," Investopedia, 2021, https://www.investopedia.com/terms/d/durbin-watson-statistic.asp.

[67] C. Zaiontz, "Durbin-Watson Table," Real Statistics using Excel, 2022, https://www.real-statistics.com/statistics-tables/durbin-watson-table/.

[68] E. Dücan and A. Bozkurt, "International Tourist Arrivals by Region of Origin and Tourism Receipts: A Panel Data Analysis," Research Journal of Politics, Economics & Management / Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Arastirmalari Dergisi 5, no. 1 (2017): 33–46, https://dergipark.org.tr/en/pub/seyad/issue/53372/709606.

[69] V. Yorucu and O. Mehmet, "The Bounds-Test Approach for Co-Integration between International Tourist Arrivals, per Capita Income and Cost of Living: The Case of All Cyprus," Applied Economics Letters 18, no. 14 (September 2011): 1327–31, https://doi.org/10.1080/13504851.2010.537616.

[70] A. Assaf, L. Alana, and C. Barros, "Persistence Characteristics of Tourism Arrivals to Australia," International Journal of Tourism Research 14, no. 2 (March 2012): 165–76, https://doi.org/10.1002/JTR.844.

[71] A. Untong, V. Ramos, M. Kaosa, and J. Rey, "Tourism Demand Analysis of Chinese Arrivals in Thailand," Tourism Economics 21, no. 6 (December 1, 2015): 1221–34, https://doi.org/10.5367/TE.2015.0520.

[72] M. Rivera, "The Synergies between Human Development, Economic Growth, and Tourism within a Developing Country: An Empirical Model for Ecuador," Journal of Destination Marketing and Management 6, no. 3 (September 1, 2017): 221–32, https://doi.org/10.1016/J.JDMM.2016.04.002.

[73] K. Choi and I. Kim, "Co-Movement between Tourist Arrivals of Inbound Tourism Markets in South Korea: Applying the Dynamic Copula Method Using Secondary Time Series Data," Sustainability (Switzerland) 13, no. 3 (February 1, 2021): 1–13, https://doi.org/10.3390/SU13031283.

[74] J. Tang and S. Sriboonchitta, "Co-Movement of China Outbound Tourism Demand: Singapore, Thailand and Malaysia," International Journal of Intelligent Technologies & Applied Statistics 6, no. 3 (2013): 225–44, https://doi.org/10.6148/IJITAS.2013.0603.02.

[75] M. Shahbaz, S. Solarin, M. Azam, and A. Tiwari, "Tourism-Induced Income Distribution in Malaysia: A Practical Experience of a Truly Asian Economy," Current Issues in Tourism 23, no. 23 (December 1, 2020): 2910–29, https://doi.org/10.1080/13683500.2019.1697648.

[76] L. Tung, "The Tourism-Led Growth Hypothesis in Transition Economies? Empirical Evidence from a Panel Data Analysis," Geojournal of Tourism and Geosites 38, no. 4 (2021): 1076–82, https://doi.org/10.30892/GTG.38412-746.

[77] M. Porada, "Measuring the Impact of Epidemic Outbreaks on Financial Results," Procedia Computer Science 192 (2021): 4063–72, https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2021.09.181.

[78] Y. Shao, S. Huang, Y. Wang, Z. Li, and M. Luo, "Evolution of International Tourist Flows from 1995 to 2018: A Network Analysis Perspective," Tourism Management Perspectives 36 (October 1, 2020), https://doi.org/10.1016/J.TMP.2020.100752.

[79] N. Leitao and D. Lorente, "The Linkage between Economic Growth, Renewable Energy, Tourism, CO2 Emissions, and International Trade: The Evidence for the European Union," Energies 13, no. 4838 (September 15, 2020): 1–16, https://doi.org/10.3390/ENL3184838.

[80] S. Sarpong, M. Bein, B. Gyamfi, and S. Sarkodie, "The Impact of Tourism Arrivals, Tourism Receipts and Renewable Energy Consumption on Quality of Life: A Panel Study of Southern African Region," Heliyon 6, no. 11 (November 1, 2020), https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E05351.

[81] M. Rivero and J. Fernández, "Global Estimation of the Elasticity of 'International Tourist Arrivals/Income from Tourism," Sustainability (Switzerland) 12, no. 20 (October 2, 2020): 1–16, https://doi.org/10.3390/SU12208707.

[82] B. Simonetti, A. Kapusuzoglu, and N. Ceylan, "The Causality Among Tourism Related Factors and GDP for EU Members," Scientific Bulletin - Economic Sciences 18, no. 2 (2019): 3–9, https://ideas.repec.org/a/pts/journl/y2019i2p3-9.html.

Production management model based on Lean Manufacturing and BPM tools to increase profitability in SMEs in the Plastic Sector

Modelo de gestión de producción basado en herramientas Lean Manufacturing y BPM para incrementar la rentabilidad en Pymes del Sector Plástico

Christian Fernandez-Albujar
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima Lima, Perú
20132764@aloe.ulima.edu.pe
Código ORCID: 0000-0001-9814-1896

Leslie La Rosa-Arízaga
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima Lima, Perú
20132874@aloe.ulima.edu.pe
Código ORCID: 0000-0002-0854-4286

Alberto Flores-Perez
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima Lima, Perú
alflores@ulima.edu.pe
Código ORCID: 0000-0003-0813-0662

***Resumen*— En el Perú, el sector de plástico ha adquirido una posición sólida en el mercado, consecuencia de ello, dicho sector debe afrontar necesidades relacionadas con el nivel de servicio y nivel de productividad; a fin de lograr optimizar el índice de rentabilidad. Por lo expuesto anteriormente, es de suma relevancia estructurar cada uno de los procesos, la proyección de la demanda, la administración de recursos y supervisión de tiempos set up. Uno de los puntos importantes a considerar respecto a lo ya mencionado es la gestión de los recursos y el mantenimiento en las máquinas, por lo que se propone plantear el uso de herramientas como Business Process Management (BPM), Total Productive Maintenance (TPM) y Single Minute Exchange of Die (SMED), homologación de proveedores y estandarización a fin de reducir el tiempo de entrega de pedidos y aumentar la baja productividad evidenciada debido al manejo deficiente de recursos productivos.**

***Abstract*-- In Peru, the plastic sector has acquired a solid position in the market, as a result, that sector must face needs related to the level of service and level of productivity; in order to optimize the rate of profitability. Due to the above, it is of the utmost importance to structure each of the processes, the projection of demand, the administration of resources and the supervision of set-up times. One of the important points to consider regarding what has already been mentioned is the management of resources and maintenance in the machines, for which it is proposed to consider the use of tools such as Business Process Management (BPM), Total Productive Maintenance (TPM) y Single Minute Exchange of Die (SMED), approval of suppliers and standardization in order to reduce the delivery time of orders and increase the low productivity evidenced due to the poor management of productive resources.**

Palabras claves — Manufactura Esbelta, Gestión de Procesos de Negocios, productividad, tiempos de configuración, sector plástico.

Keywords — Lean Manufacturing, Business Process Management, productivity, time set up, plastic sector.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sector del plástico ha desarrollado grandes avances tecnológicos que ha permitido un gran crecimiento de la productividad y rentabilidad en países, principalmente, en América Latina, representando el 4.4% de la producción mundial. En Perú, el sector de plástico ha adquirido una posición sólida en el mercado; sin embargo, mantiene deficiencias en sus procesos productivos con bajos índices de eficiencia, haciendo que enfrente, constantemente, problemas a nivel de producción como paradas no planificadas de las máquinas y, la que conlleva a que no se cumpla con las entregas de las demandas requeridas a tiempo [1]. La investigación hace referencia a la importancia de proporcionar una utilización eficiente y eficaz de los recursos para no incurrir en costos adicionales por pérdidas y poder optimizar la producción [2]. Estudios estadísticos recientes han revelado que las empresas plásticas operan un 30% de su capacidad, por lo que se evidencia que existen aún limitaciones en su operación y una menor producción que no satisface la demanda en dicho mercado. [3].

La revisión de la literatura hace hincapié en disminuir el tiempo de preparación (tiempo set up) en las empresas del sector plástico basándose en cambios metodológicos, ya que este ayuda a simplificar las actividades de programación y mejora el lead time [4]. El problema identificado en las empresas que se dedican a la fabricación de diferentes tipos de productos es que el tiempo de producción es prolongado, por lo que tienen como objetivo principal reducir el tiempo de configuración y hacer eficiente la línea de producción frente a los requisitos cambiantes del cliente [5]. La propuesta de Single Minute Exchange of Die (SMED) se basa, principalmente, en cambios metodológicos y cambios de diseño en la maquinaria y equipo para simplificar y estandarizar las operaciones. Sin embargo, para el moldeo por inyección de plástico, las propuestas de SMED siguen siendo incapaces de proporcionar las soluciones necesarias para simplificar y estandarizar la sesión de configuración de parámetros de cambio [6]. Lo mencionado anteriormente, deja

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00018

claro que las empresas del sector plástico tienen procesos ineficientes, por lo que se hace necesario seguir con la búsqueda de nuevas soluciones industriales ante la problemática mencionada [7]. Es necesario que las empresas del sector plástico peruano implementen una nueva metodología de trabajo para ser más eficientes y que cumplan con la demanda proyectada del sector viéndose reflejada en una mejor rentabilidad para la empresa.

A través de la búsqueda de una reducción en los altos tiempos de set-up comprendido principalmente por el cambio de manga de sacos y por los altos tiempos de programación; además de paradas de máquina no programadas por el apoyo del operario en otra área fuera del proceso productivo que generan pérdidas monetarias significativas del 30% de la utilidad neta. De esta forma, un modelo mejorado que involucra las herramientas SMED y Total Productive Maintenance (TPM) basado en Lean Manufacturing es propuesto. La presente investigación tiene el objetivo de desarrollar una combinación de herramientas específicas a fin de lograr objetivos beneficiosos en cuanto a la productividad de los procesos de una empresa del sector plástico.

El presente artículo científico, está dividido en siete partes las cuales son Introducción, Aporte, Validación, Conclusiones y Referencias.

II. ESTADO DEL ARTE

Para la presente investigación se tuvieron en cuenta los siguientes conceptos; los cuales se obtuvieron de una revisión sistemática del tema en estudio. A continuación, los aspectos importantes a considerar y la relación existente entre ellos.

A. Rentabilidad

Las empresas manufactureras pymes presentan, constantemente, un aumento en las devoluciones de productos debido a la mala manipulación de materiales generados por el excesivo tiempo de preparación en las máquinas, incurriendo en costos representativos originados por reprocesos y tiempos muertos que afectan a la rentabilidad de la organización [5][6]. Es imprescindible que las empresas planteen un modelo de producción que les permita operar con altos niveles de calidad, productividad y bajos costos, además de ser capaces de responder de manera eficiente a las crecientes demandas del mercado [8][1]. Es por ello que, comprender los principios generales de la producción puede aportar positivamente a las empresas manufactureras de dicho sector haciéndola eficiente y más rentable [7]. Evaluar los costos y mejorar los procesos a través del análisis con indicadores de productividad es imprescindible para lograr una ventaja competitiva [5][9]. Una adecuada implementación de un modelo de producción a las mypes se traduciría en mejoras significativas en la reducción de reprocesos y el tiempo total de preparación, aumentando así la eficiencia del proceso productivo y logrando alcanzar mayor rentabilidad [6][4][7].

B. Business Process Management (BPM)

La herramienta propuesta Business Process Management (BPM), se emplea para cruzar los límites de las funciones de negocio y mejorar la integración. Una integración mejorada puede conducir a niveles más altos de efectividad y eficiencia, pero también a una mejor estructura de procesos que es la base de la flexibilidad en las operaciones [10]. Dado que la organización es un sistema de procesos comerciales interconectados, la integración en BPM para mapear y rediseñar los procesos comerciales juega un papel fundamental en impulsar un desempeño organizacional superior que mantenga ventajas competitivas en costos, tiempo, calidad, productividad, producto y complejidad de servicio [18]. La falta de medición de mejora de BPM relacionada con el desempeño de la empresa puede ser el principal obstáculo para iniciar iniciativas de mejora de BPM en las Pymes (pequeña y mediana empresa) [11]. Las evidencias empíricas de iniciativas exitosas en la adopción de soluciones BPM implica la evaluación en una organización. El nivel de personalización del ciclo BPM, la arquitectura interna de los procesos y su integración con fuentes externas de información, así como la metodología que guía el programa de mejora BPM constituyen dimensiones que deben armonizarse con flexibilidad [13][12].

C. Total Productive Maintenance (TPM)

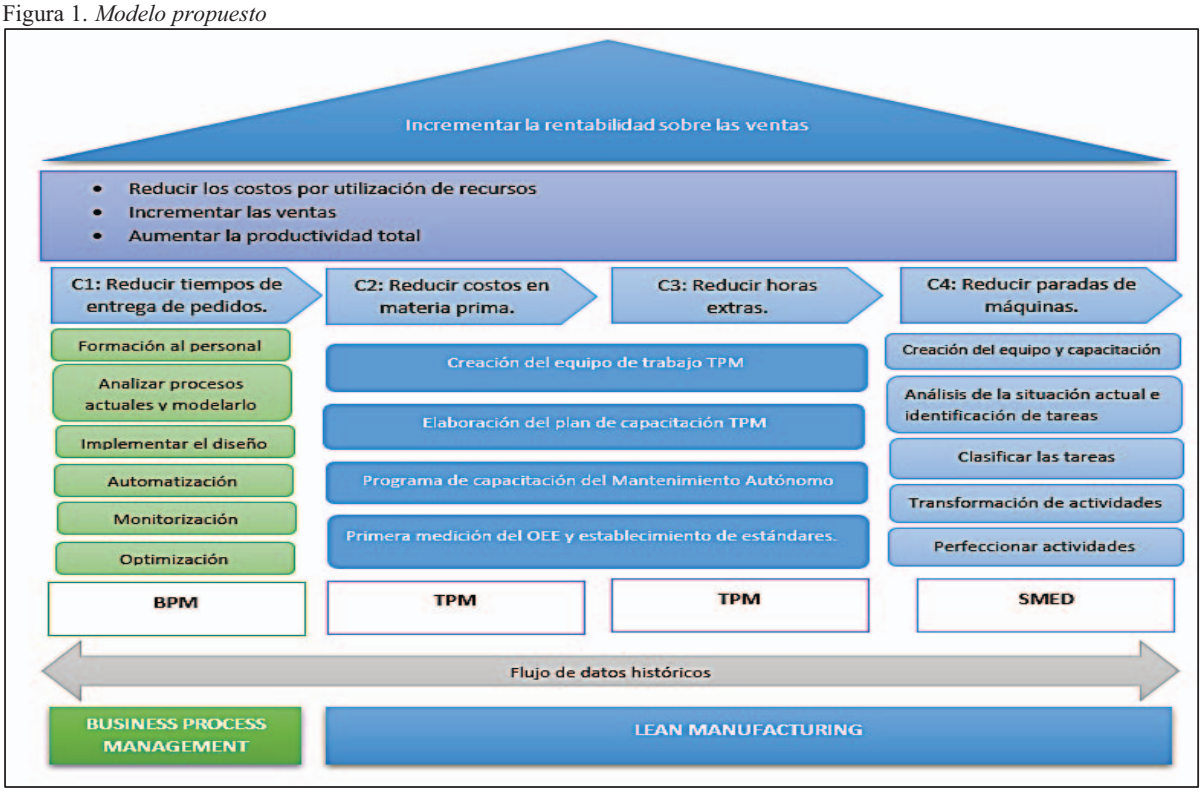
Las empresas manufactureras buscan, constantemente, acciones de mejora con el objetivo de aumentar la rentabilidad y reducir las causas asociadas a fallas de equipos, paradas de máquina y desperdicios asociados a tiempos de producción para optimizar el rendimiento y asegurar la posición competitiva [14]. Por otro lado, la industria del plástico se ha enfrentado a cambios importantes como el aumento drástico de la competencia en donde los consumidores se concentran en la calidad, el tiempo de entrega y el costo del producto [19]. Frente a esta circunstancia, es indispensable que las empresas introduzcan un modelo de producción que permita mejorar la efectividad general del equipo (OEE), la adecuada utilización de los recursos y el aumento del rendimiento de las máquinas existentes [20]. Con la ejecución del Total Productive Maintenance (TPM) en la máquina de la empresa evaluada, se puede ver claramente que el porcentaje de pérdida de producción se reduce mostrando el aumento de la productividad de la máquina y con ello una disminución en el número de paradas de la máquina, aumentando la rentabilidad de la empresa [15]. El procedimiento de implementación y el compromiso adoptado por todo el personal y la dirección de la empresa es el secreto del éxito. Ya que se obtuvo un aumento en la disponibilidad de las máquinas y la Efectividad general del equipo (OEE) de aproximadamente el 5% en el caso evaluado. El procedimiento de implementación y el compromiso adoptado por todo el personal y la dirección de la empresa es el secreto del éxito [14].

III. APORTE

A. Fundamento del modelo

Hoy en día, las empresas manufactureras buscan acciones de mejora para aumentar la rentabilidad y mitigar las causas asociadas a fallas de equipos, paradas de máquina, desperdicios asociados a tiempos de producción y la utilización de recursos a fin de optimizar el rendimiento y asegurar la posición competitiva en las industrias del sector plástico [16]. Bajo esta perspectiva, el modelo de gestión de producción propuesto se basa en la herramienta Lean Manufacturing, una filosofía de trabajo que permitirá obtener mayor ventaja competitiva en las industrias pymes del sector plástico, así como Business Process Management (BPM) que, a través de un método de mapeo y revisión sistemática de la literatura, determina los elementos irrelevantes existentes entre las áreas involucradas en el proceso. El aporte del modelo se encuentra en la implementación de componentes

Figura 1. *Modelo propuesto*



referentes al sector plástico en estudio, como la reducción de tiempos improductivos y de set-up que generan la baja productividad total en la empresa, así como la falta de la alineación en la planificación de producción para obtener su máximo rendimiento y satisfacer la demanda del mercado.

Tabla 1. *Matriz comparativa de los Componentes de la Propuesta vs Estado del Arte.*

Causas u Objetivos / Artículos científicos	**Causa u objetivo 1:** Gestión de pedidos	**Causa u objetivo 2:** Altos costos en materia prima	**Causa u objetivo 3:** Gestión de mantenimiento	**Causa u objetivo 4:** Gestión de Set Up
Silva Alfredo., & Salas Rosa. (2017)		TPM	TPM	SMED
Kübra YazICI., Semra Boran., & Seda Hatice Gökler. (2021)				SMED
Rohan Thorat., & Mahesha GT. (2018)		TPM	TPM	
Dusun Gosnik., & Igor Stubelj. (2021)	BPM			
Sara Castro., & Leonor Teixeira. (2020)	BPMN			
Propuesta	**BPM**	**TPM**	**TPM**	**SMED**

B. Modelo Propuesto

Se propone un modelo de gestión de producción basado en herramientas Lean Manufacturing como Single Minute Exchange of Die (SMED) y Total Productive Maintenance (TPM) con el fin de obtener mayor disponibilidad de las máquinas y reducir los tiempos set up e improductivos, los cuales están asociados con el material, el proceso y el costo del proceso productivo [17]. Por otro lado, se propuso un modelo basado en Business Process Management (BPM) que permita mejorar la agilidad del negocio en la organización en términos de eficacia y eficiencia mediante la integración de las áreas que involucran los procesos administrativos y los procesos industriales a fin de poder reducir la brecha que existe en cuanto al sistema de información [10]. El modelo propuesto se dará inicio con la implementación de la herramienta SMED y TPM, cuyo objetivo es incrementar la disponibilidad de la máquina, eliminar los tiempos muertos para aumentar la capacidad de producción y mejorar la rentabilidad de la empresa. Finalmente, Business Process Management (BPM), cuyo fin es alcanzar una mejor administración de los recursos y eliminar las actividades que no generan valor, aquellas que conllevan a la baja productividad de la empresa, el principal motivo de nuestra brecha técnica: Baja rentabilidad. Para ello, es importante la medición de indicadores previa y post implementación de la propuesta de mejora a fin de poder rendir los resultados esperados y medir el impacto económico que éste genera. El modelo propuesto se desarrollará en tres (3) eventos o etapas que más adelante se mostrará mediante una gráfica.

C. Componentes del modelo

La propuesta se divide en tres (3) fases y se explica cada una a continuación:

Fase 0: Concientización

Involucra todas las actividades previas a la puesta en práctica de la propuesta. En esta etapa, se concientizó a todo el equipo del trabajo sobre el proyecto de mejora, explicando en qué consiste la filosofía de trabajo Lean Manufacturing y el impacto positivo que esta genera económicamente en los procesos productivos. Seguidamente, se dio a conocer la situación actual de la empresa a fin de comprometer al equipo y dar una solución de mejora frente a la problemática actual.

Para finalizar, se resolvieron las consultas generadas referentes al desarrollo del modelo Lean Manufacturing y se anunció el plan estratégico definido.

Fase 1: Business Process Management (BPM)

El desarrollo de la primera fase está compuesto por la herramienta BPM que tiene como objetivo controlar los procesos productivos de la empresa adoptando una serie de acciones que modifiquen la forma de trabajar de la empresa mejorando los procesos con un enfoque hacia el cliente.

Para la correcta implementación de la herramienta BPM se emplearon 4 etapas, comenzando con la primera etapa de modelar, la cual consiste en examinar detalladamente los procesos y áreas involucradas en la empresa. La segunda etapa ejecutar, consiste en desarrollar lo planificado para la mejora en los procesos y poner en acción el diseño definido. La tercera etapa monitorear, consiste en auditar para verificar que los procesos implementados estén alineados con los objetivos de la organización a través de la medición y siendo posible conocer los resultados. La cuarta y última etapa para optimizar, consiste en rediseñar las estrategias definidas para potenciar la mejora y aumentar el rendimiento.

Fase 2: Mantenimiento Productivo Total (TPM)

En la implementación de la fase tres, se propuso la herramienta TPM que inicia con el análisis de la situación actual de la maquinaria utilizada en el proceso para el descarte de tiempos improductivos respectivo. Además, se planifica la aplicación de un programa de mantenimiento preventivo con el objetivo de reducir las fallas recurrentes y crear planes de acción preventiva frente a averías conocidas. Cabe destacar, que se empleará un programa de mantenimiento autónomo que fue una novedad en la empresa evaluada, buscando calificar su rendimiento frente al mantenimiento preventivo. Tras poner en práctica al TPM en el sistema de máquinas de la empresa, se procedió a medir el impacto de mejora que tuvieron los tiempos improductivos. Finalmente, se contó con un plan de mantenimiento estructurado para la maquinaria más crítica del proceso productivo.

Fase 3: Single Minute Exchange of Die (SMED)

Por último, la tercera fase del modelo está compuesta por la herramienta SMED, que permitió generar grandes reducciones en los tiempos de set up, simplificando y optimizando las operaciones involucradas en cada set up para lo cual se tomaron los tiempos iniciales, previo a la implementación de la metodología. Se convertirá la mayor cantidad de actividades en tareas externas que no afectarán las operaciones del proceso productivo. De esta manera se podrán organizar de mejor manera las actividades, optimizando el proceso. Finalmente se medirán los tiempos de set-up finales con el objetivo de evaluar la magnitud del impacto positivo de la herramienta en la empresa.

D. Indicadores

El modelo propuesto se enfocó en la zona de conversión. Se definieron los siguientes indicadores a fin de medir los indicadores y evaluar el impacto de la propuesta de mejora:

- Rotura de Stock: Es la cantidad demandada por un cliente insatisfecho por la falta de abastecimiento del producto terminado para poder atenderlo.
  Objetivo: Reducir la rotura de stock de productos terminados a un 3%.

$$\text{Rotura de Stock} = \frac{Cantidad\ desabastecida}{\text{Cantidad total requerido}}\ x\ 100\%$$

- Overall Equipment Effectiveness (OEE): Mide la eficacia de la maquinaria industrial y sirve como herramienta para la mejora continua dentro del proceso productivo.
  Objetivo: Aumentar el OEE del área de conversión a 75%.

$$OEE = \%Rendimiento x \%Calidad x \%Disponibilidad$$

- Tiempo Set Up: Calcula el valor porcentual de la mejora entre el tiempo total inicial y el tiempo total final respecto a la actividad de configuración (calibración) y preparación de la maquinaria convertidora.
  Objetivo: Reducir el tiempo set up del área de conversión un 20%.

$$TSU = (Tsu\ inicial - Tsu\ final) * 100\%$$

IV. VALIDACIÓN

A. Escenario de validación

Se procedió a simular el modelo inicial (sin la mejora) y el escenario mejorado con la ayuda del software de simulación Arena, en el cual se utilizaron eventos discretos con el objetivo de encontrar el escenario propuesto para la optimización del modelo. Es importante mencionar que el proceso productivo simulado inicia con el área de conversión, seguida de impresión, prensa, y culmina con la inspección, ya que esta parte es la que comprende los eventos discretos. Además, hay que considerar que en el área de conversión ingresan 12 entidades (rollos de tejido de polipropileno) por día, a pesar de que se generen un total de 66 entidades de rollos de tejido de polipropileno (teóricas) que salen del área de telares y terminan en cola esperando ser ingresadas al área de conversión. En el primer escenario se simuló la situación actual del proceso productivo, en la que no se considera la implementación de las herramientas de mejora, bajo los parámetros ya mencionados anteriormente, con la finalidad de observar las falencias del primer escenario. Por otro lado, el segundo escenario se simuló tomando en consideración las propuestas de mejoras implementadas al proceso, obteniendo resultados óptimos en la que se evidenció reducciones en tiempos.

B. Simulación

El primer escenario está conformado por el proceso de recepción de pedidos (en millares de sacos) en el área comercial, que consiste en la atención de llamadas, elaboración de cotizaciones y el reporte de pedidos vía WhatsApp al área de producción. Cabe mencionar que, no se contaba con una política de inventarios ni un sistema ERP a fin de poder verificar las existencias del producto terminado solicitado: lo que generaba retrasos en la entrega a tiempo de los pedidos y sobre stock. Por otro lado, abarca el proceso productivo de sacos de polipropileno, que está conformado por: conversión, impresión, prensado e inspección; en la que mediante un diagnóstico se identificó como cuello de botella el área de conversión, ya que esta área presentaba una baja productividad por horas extras generados por tiempos improductivos en la programación de la máquina y las paradas de máquinas causadas por demoras en tiempos set up. Sin embargo, con la implementación del modelo diseñado se logró optimizar el proceso de recepción de pedidos mediante la generación de una orden de producción con previa coordinación con el área de almacén de productos terminados, con el fin de evitar incurrir en sobreproducción y pedidos desatendidos. Por otro lado, se obtuvo una mejor medición del indicador OEE mediante la reducción de los tiempos no programados y las paradas no planificadas de las máquinas en el área de conversión. Finalmente, en el área de conversión del proceso productivo se convirtieron algunas actividades internas a externas con la finalidad de mejorar el tiempo set up en actividades como: cambio de manga de saco y configuración de la máquina convertidora, reduciendo el tiempo set up en 38.74%.

C. Variables de entrada

Se clasificaron en variables no controlables (exógenas) y controlables (endógenas) respectivamente, asimismo se tomaron los tiempos de cada proceso involucrado en el sistema: Recepción del pedido, conversión, impresión, prensa e inspección.

Tabla 2. *Inputs no controlables y controlables*

Inputs no controlables	**Inputs controlables**
Tiempos inherentes de producción	Tiempo inicio de operación (hora de llegada)
Producto no conforme	Recurso humano por máquina y/o proceso.
Planificación de producción	Número de máquinas
Producto semielaborado (millares)	Número de instrumentos (balanza)
Número de falla	-
Tiempos inherentes de operación.	-
Tiempo de traslado	-
Stock	-

A fin de determinar el número de corridas óptimo en la salida del sistema y poder validar el modelo de la simulación, se basaron criterios del Output Analyzer, los cuales arrojaron resultados significativos.

Se procede a presentar los indicadores teóricos planteados inicialmente, los cuales se construyeron con el objetivo de hacer una comparación de los resultados obtenidos del sistema original y mejorada, luego de haber implementado las herramientas propuestas.

Tabla 3. *Resumen de indicadores del sistema original y mejorado*

Causa	Indicador	Original	Objetivo	Mejorado
Deficiente entrega de pedidos a tiempo	% Rotura de stock	4,73%	3%	1,72 %
Horas extras	% OEE	63,26%	65% <x < 75%	65,89 %
Paradas de máquina	Tiempo set up (minutos)	325	160 < x < 260	246

Esta la presente investigación se involucró la implementación de la herramienta BPM y de Lean Manufacturing como TPM y SMED, teniendo en cuenta sus ventajas y limitaciones.

El Ministerio del Ambiente (MINAM) señala que actualmente el plástico representa el 10% de todos los residuos que se generan en el país [21]. Por lo tanto, una mayor investigación requiere considerar una modalidad como la logística inversa a nuestro modelo de implementación propuesto a fin de generar una industria del plástico sostenible; la cual consiste en recuperar y reciclar los desechos plásticos mediante el ahorros de producción, y/o retorno de los excesos de esta a través de la reutilización del producto en su totalidad.

V. CONCLUSIONES

La implementación de la herramienta Lean Manufacturing y Business Process Management (BPM) pueden mejorar la rentabilidad de la empresa resolviendo sus principales motivos como el bajo nivel de servicio y baja productividad que esta presenta. Se obtuvo como resultado una mejora en los indicadores que se asignaron a fin de evaluar la situación actual de la empresa en estudio. Mediante el análisis en el árbol de problemas se identificó a la rotura de stock de productos terminados (4.73%) como la causa principal de obtener un bajo nivel de servicio debido a que no se atendían las cantidades solicitadas de producto terminado y los pedidos no eran entregados a tiempo. Por otro lado, en el indicador OEE (63.26%) de la situación actual se evidencia pérdidas económicas originadas, principalmente, por tiempos improductivos en la programación de la máquina, lo que genera las horas extras innecesarias, lo que conlleva a una baja productividad. Por último, el tiempo set up (325 min) es muy elevado y es originado por una inadecuada gestión de las actividades que comprende el área de conversión, debido a los tiempos improductivos, set up y las paradas máquina. Al aplicar Value Stream Mapping (VSM) y analizar las principales causas raíz, se concluye que el área de conversión fue la más afectada, al ser un área que genera el cuello de botella en el proceso productivo de la empresa evaluada, debido a que existe acumulación de producto (rollos de polipropileno) que salen del área de telares a la a la espera de su turno para ser procesado por dicha área. Se generan altas horas improductivas que repercuten en la producción y terminan afectando al cliente final. Por ello con la propuesta de mejora utilizando SMED se logró mejorar los tiempos de producción haciendo más eficiente al área de conversión reduciendo los tiempos set up a 246 minutos como resultado final. En la elaboración del Bizagi del proceso actual pudimos concluir la mala gestión de los procesos de la empresa en donde se ingresan pedidos de producción sin contar con un sistema administrativo de inventarios o existencias y una mala

Figura 2. *Modelo de simulación de la situación mejorada*

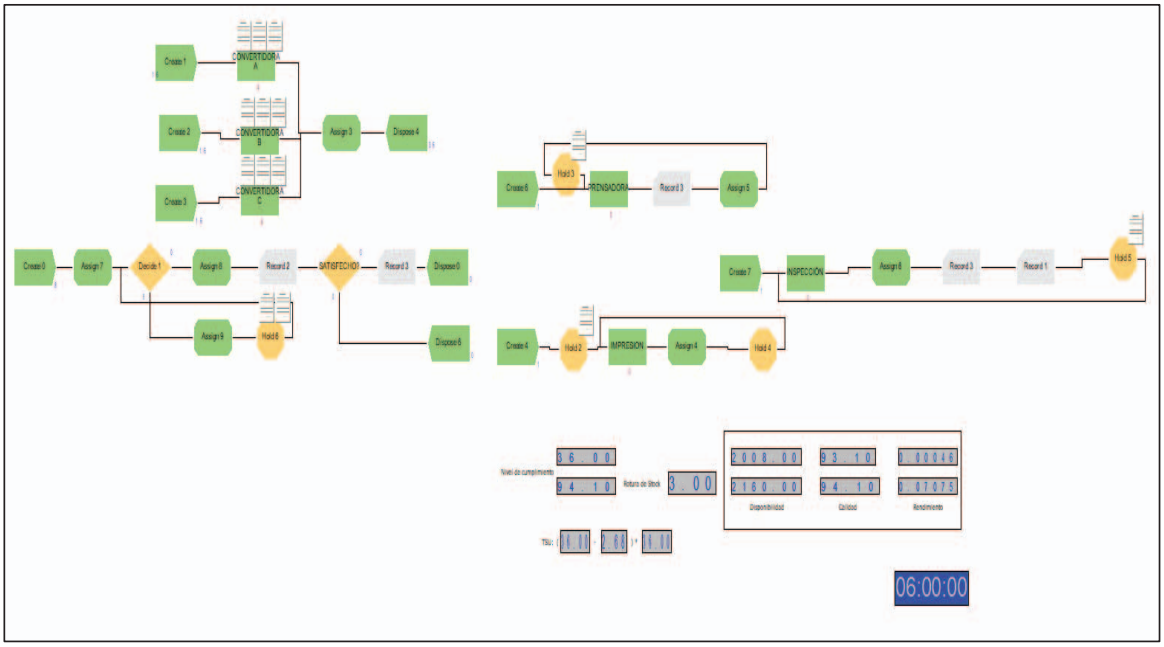


Figura 2. *Modelo de simulación de la situación mejorada*

política del manejo de estas. Para lo cuál en la propuesta de mejora con la implementación de un sistema ERP y aplicando el BPM, se logró mejorar la rotura de stock alcanzando el 1.72% dando como resultado un mejor nivel de servicio. La correcta aplicación del TPM en el área de conversión logró aumentar la disponibilidad del producto, la calidad de este y el rendimiento de la empresa logrando un OEE de 65.89% reduciendo las pérdidas económicas y baja competitividad con la que se encontraba cuando estaba con un OEE de 63.26% considerado inaceptable. Cabe mencionar que en el rango de $65 < x\% < 75$ las pérdidas económicas solo serán aceptables si la fábrica se encuentra en proceso de mejora.

REFERENCIAS

[1] Ames, V., Vásquez, W., Macassi, I., Raymundo, C. (2019). Modelo de Gestión de mantenimiento basado en Lean Manufacturing para incrementar la productividad de una empresa del sector de Plástico. *Multiconferencia internacional de LACCEI para ingeniería, educación y tecnología.* Perú

[2] Jadayil, W., Khraisat, W., Shakoor, M. (2017). Diferentes estrategias para mejorar la producción para alcanzar la capacidad óptima en empresa plástica. *Cogent Engineering.* Estados Unidos.

[3] Diario Gestión (2020). Empresas del sector plástico operan actualmente a un 30% de capacidad. Wilfredo Huanachin. https://gestion.pe/economia/empresas/empresas-del-sector-plastico-operan-actualmente-a-un-30-de-capacidad-noticia/

[4] Guillén, K., Umasi, K., Quispe, G., Raymundo, C. (2018). Modelo Lean para optimizar la producción de bolsas de plástico en pequeñas y medianas empresas en el sector de plásticos. *Revista Internacional de Investigación y Tecnología en Ingeniería.* Perú

[5] Silva, A., Salas, R. (2017). Aplicación de técnicas lean para reducir los tiempos de preparación: estudio de caso de una empresa peruana de plásticos. *Revista Internacional de Investigación en Ingeniería Aplicada ISSN 0973-4562 Volumen 12, Número 23.* Perú

[6] Mau, M., Ramos, R., Llontop, J., Raymundo, C. (2019). Modelo de gestión de producción lean manufacturing para incrementar la eficiencia del proceso productivo de una empresa MYPE del sector químico. *17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities"*. Perú

[7] Buitrón, L., Viacava, G., Eyzaguirre, J., Raymundo, C. (2020). Modelo de Lean Manufacturing basado en el ciclo de Deming y desarrollado en Gantt para incrementar la eficiencia dentro de empresas de plástico. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.* Perú

[8] Pagliosa, M., Tortorella, M., Ferreira, C. (2019). Industria 4.0 y Manufactura esbelta Una revisión sistemática de la literatura y direcciones de investigación futuras. *Emerald Insight*. Brasil

[9] Godinho, M., Devós, G., Gunasekaran, A. (2016). La manufactura esbelta en las pequeñas y medianas empresas brasileñas: implementación y efecto en rendimiento. *International Journal of Production Research*. Estados Unidos

[10] Erasmus, J., Vanderfeesten, K., Traganos, K., Grefen, P. (2020). Uso de modelos de procesos comerciales para la especificación de operaciones de fabricación. *Informática en la industria 123*. Países Bajos

[11] Fernandes, J., Reis, J., Melao, N., Teixeira, L., Amorim, M. (2021). El papel de la industria 4.0 y BPMN en el surgimiento del mantenimiento predictivo y basado en condiciones: un estudio de caso en la industria automotriz. *Aplicado ciencias.* Portugal

[12] Son, MJ., Kim, TW. (2013). Implementación de un modelo de gestión de procesos de negocio ejecutable para el proceso de diseño de producción de cascos de barcos. *J Mar Sci Technol*. Corea del Sur

[13] Kubra, Y., Semra B. & Seda H. (2021). Un modelo FMEA difuso SMED integrado para reducir el tiempo de configuración. *23 Journal of Intelligent Manufacturing.* Inglaterra

[14] Pinto, G., Silva, FJG., Fernandes, NO., Casais, R., Baptista, A., Calvalho, C. (2020). Implementación de un plan estratégico de mantenimiento mediante metodología TPM. *Revista Internacional de Industria Ingeniería y Gestión.* Serbia

[15] Rohan, T., Mahesha, GT. (2018). Mejora de la productividad a través de la implementación de TPM. *CrossMark*. India

[16] Singh, S., Gupta, S., Ladhe, YP. (2017). Teoría de fusión secuencial entrante de gestión diversa como Lean, JIT, TPM, ERP para eliminar elementos sin valor para una productividad superior en Planta Exhaustiva. *Revista Internacional de Investigación en Ingeniería y Ciencias Generales Volumen 5, Número 3*. India

[17] Irfan, S., Khan, M., Lakho, T., Indher, A. (2020). Revisión de las prácticas de mantenimiento productivo total (TPM) y eficacia general del equipo (OEE) en la fabricación. *Revisión de las prácticas de mantenimiento productivo total (TPM) y eficacia general del equipo (OEE) en la fabricación*. Bangladesh

[18] W. Viriyasitavat, L. Da Xu, Z. Bi, y A. Sapsomboon, «Blockchain-based business process management (BPM) framework for service

composition in industry 4.0», *J. Intell. Manuf.*, vol. 31, n.º 7, pp. 1737-1748, oct. 2020.

[19] R. Thorat y G. T. Mahesha, «Improvement in productivity through TPM Implementation», Mater. Today Proc., vol. 24, pp. 1508-1517, 2020.

[20] S. Nallusamy, V. Kumar, V. Yadav, U. Kumar, y P. Y. Sk, «IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL A INDUSTRIAS DE ESCALA INMEDIA», *Rev. Int. Investig. y Desarro. Ing. Mecánica y Prod.*, vol. 8, n.º 1, pp. 1027-1038, 2018.

[21] MINAM (2018). El plástico representa el 10% de todos los residuos que generamos en el Perú.

Optimization design for picking times through 5S, ABC model and cycle counting in a sanitary company

Diseño de optimización de los tiempos de picking mediante 5S, modelo ABC y conteo cíclico en una empresa sanitaria

Maria Gracia Tineo-Morales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Peru
20161425@aloe.ulima.edu.pe
ORCID 0000-0002-6572-7281

Sebastian García-Angulo
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Peru
20160598@aloe.ulima.edu.pe
ORCID 0000-0002-4183-7427

Alberto Flores-Perez
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Peru
alflores@ulima.edu.pe
ORCID 0000-0003-0813-0662

***Abstract*— Within the companies and organizations whose objective is to take care of society's health, there is the need to efficiently stock up with medicines, instruments or other supplies to take care of health. In hospitals, emergency areas have as a critical factor the time in which this supplies are carried out without setbacks and avoiding a stock break. The picking processes for the collection of these items, which are later directed to emergency subareas, urgently need to be carried out in the most efficient way possible, so as a result, it was proposed to reformulate the internal processes within the supply of the general warehouse of a emergency hospital in Peru, using tools such as 5S, the ABC model and cycle counting.**

Keywords*— *Lean Warehousing, 5S, ABC model, cycle counting, picking.

***Resumen* — Dentro de las empresas y organizaciones que presentan como objetivo cuidar de la salud de la sociedad, existe la necesidad de abastecerse de forma eficiente con medicamentos, instrumentos u otros insumos para cuidar de la salud. En los hospitales, las áreas de emergencia tienen como factor crítico el tiempo en el cual se realiza este abastecimiento sin contratiempos y evitando que se genere una ruptura de stock. Los procesos de picking para la recolección de estos artículos, los cuales son posteriormente dirigidos a subáreas de emergencias, tienen por urgencia ser realizados de la forma más eficiente posible, de modo que se propuso reformular los procesos internos dentro del abastecimiento del almacén general de un hospital de emergencia en Perú, utilizando herramientas como las 5S, el modelo ABC y el conteo de ciclos.**

Palabras claves* —*Lean Warehousing, 5S, modelo ABC, conteo cíclico, picking.

I. Introducción

La logística hospitalaria, al igual que en otras industrias, presenta inconvenientes similares con respecto a la falta de optimización de recursos [1]. Entre los problemas más frecuentes que existe en la logística hospitalaria se encuntran la desorganización, los riesgos a la salud de los colaboradores, la ineficiencia de los procesos y otros factores que generan una mala calidad de los servicios [2]. En el caso de estudio presentado, la carencia de orden dentro de la industria sanitaria se vio reflejada en una deficiente gestión de almacenes e inventarios, entendiendo por "desorganización" a la carencia de mecanismos de control sobre los inventarios y almacenes dentro de la empresa. Esto generó que se presenten errores de control en el corto y mediano plazo, ineficiencia en el uso de recursos y reducción de la rentabilidad empresarial [3]. Bajo este contexto, la mala gestión de inventarios puede ser causada por la falta de control en los almacenes y, por ende, ocasionar retrasos en el proceso de picking los productos. Del mismo modo, al obtenerse una ineficiente data con respecto a la existencia de productos en el almacén, hay una mayor tendencia de ocasionar ruptura de stock o inventarios no productivos y lo cual en algunos casos puede terminar en una demanda no satisfecha del cliente y al tratarse de un área que atiende casos de emergencia, se pone en peligro la vida de los pacientes. De la misma forma, en el presente caso, se tiene que factores como una ineficiente estructuración del layout dentro de las diferentes áreas, la mala distribución de los artículos entre los almacenes y la desorganización del personal y falta de compromiso por mantener el orden del almacén ocasionó un aumento de tiempos de picking y mayores distancias recorridas para obtener todos los elementos de una orden de despacho.

II. Estado del Arte

A. 5S

Uno de los factores principales por los que los procesos en la cadena de suministro resultaban complejos y con altos costos, se debió a que múltiples actividades del proceso no añadían valor y a su vez implicaban costos en almacenamiento [4]. 5S es una herramienta de Lean Manufacturing que trata de establecer y estandarizar una serie de rutinas de orden y limpieza en el puesto de trabajo [5]. Mediante la implementación de esta herramienta se buscó mejorar tanto el espacio de trabajo como la eficiencia

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00019

y efectividad en las operaciones a efectuar. Por ello, se puso en marcha la herramienta 5s, la cual es base fundamental para las demás herramientas y gran apoyo para el proceso de mejora de las demás áreas.

B. Modelo ABC

Este método, conocido por sus siglas que significan Activity Based Costing, permite poder organizar los diferentes elementos a considerar en los inventarios, de forma que se pudiera priorizar el valor que cada uno de estos posee para poder optimizar la administración de recursos dependiendo de la importancia de cada artículo [6]. Por otro lado, la aplicación de Pareto al modelo ABC ayudó a que, junto con el análisis histórico de costos y rotación de productos, se logre identificar y agrupar en los segmentos A, B o C los distintos artículos según su relevancia y valor para un mejor manejo y que se les pueda dar la atención requerida con el menor riesgo posible.

C. Conteo Cíclico

Dentro del contexto de gestión de inventarios, es común encontrar al conteo cíclico como una de las principales herramientas para poder llevar a cabo una correcta contabilidad de los elementos almacenados. Este método, tuvo como principal objetivo poder llevar un control y registro exacto de los artículos, el cual se llevó a cabo de forma periódica a fin de poder tener la información actualizada de manera constante. La ventaja que tuvo fue de poder identificar las diferencias de los registros de inventario y los recuentos reales que se realizaban del mismo, a fin de que no existieran diferencias en las existencias reales en comparación a las registradas [7].

III. Aporte

La presente investigación se fundamentó principalmente en la necesidad y propuesta de reducir los tiempos de picking y minimizar la ruptura de stock mediante la implementación metodología Lean Warehousing (5S), el modelo ABC y el conteo cíclico para un almacén de materiales biomédicos que abastece a un área critica en una empresa de la industria sanitaria.

En primer lugar, se implementaron las 5s, debido a que se encontró una dificultad en el proceso de recepción y despacho de pedidos productos causados por el desorden y carencia de limpieza dentro del layout del almacén. Cabe destacar, que la falta de orden y limpieza se dio principalmente por la acumulación de materiales carentes de valor o innecesario, desconocimiento e incorrecta ubicación de las existencias biomédicas y la escasez de documentos de control visual. En segundo lugar, se propuso el uso del modelo ABC, para optimizar la gestión de la logística del almacén por medio de la clasificación de los materiales acorde a su demanda para poder minimizar los tiempos y distancias recorridas dentro de la zona antedicha al momento de efectuar su labor.

Finalmente, se puso en marcha la aplicación del conteo cíclico, el cual evitó, por medio de datos históricos, rupturas de stocks y pérdidas [8] así como también la inadecuada previsión de la demanda y, por ende, logró un correcto pronóstico de la misma. Dentro del área crítica, existía una alta demanda de materiales que no era satisfecha por el almacén, debido a los pedidos atípicos que rompían con el stock. Por otro lado, la entrega de materiales en el almacén presentaba de forma constante retrasos, a pesar de que estos tenían como objetivo realizarse cada dos días.

A. Diseño general de la propuesta

Primero se realizó el diagnóstico del área mediante el cual se en donde se ahondó en los distintos problemas que el almacén presentaba. Además, se recopiló la información necesaria del almacén, de modo que se pudiera estudiar de forma cuantitativa la demanda y el abastecimiento que se realizaba al almacén. Con esto, se definió que las herramientas de ingeniería seleccionadas para optimizar serían tres: las 5s, el modelo ABC y el conteo cíclico.

En segundo lugar, se implantó la herramienta de las de las 5s para poder establecer orden y limpieza dentro del área mencionada. Después, se aplicó el modelo ABC para ayudar a reducir los tiempos de recepción y entrega y distancias de movilización. De la misma forma, dicho modelo permitió la clasificación de productos acorde a su demanda.

Por último, se implementó conteo cíclico para obtener una previsión adecuada de la demanda y que, por ende, no exista una insatisfacción por ausencia de materiales.

B. Desarrollo de herramientas

Antes de empezar las implementaciones, se llevó a cabo un diagnóstico y análisis del área para conocer las actividades que adicionaban valor y las que no generaban ni añadían ninguna clase de valor a los procsos. Luego, se identificaron los problemas en un listado sobre los cuales se pudo diseñar el despliegue de la implementación de las mejoras propuestas. Luego, se realizó un diagrama de Ishikawa a fin de poder identificar las causas raíz, sobre lo cual se verificó que los principales problemas eran falta de organización, inventario poco preciso y acumulación en el almacén.

Herramienta 1: 5S

Para la primera fase, Seiri, la cual hace referencia a la eliminación, se depuraron lo elementos innecesarios del almacén, los cuales, al ser sin valor, fueron clasificados entre: depuración, por antiguamiento, obstrucción y obsolescencia. Luego, la segunda fase, Seiton, referente a ordenar, se organizaron los materiales biomédicos a fin de poder encontrar la mejor ubicación y delimitación de espacios en el almacén del área crítica, por lo que se asignaron códigos de ubicación para los artículos. En la tercera fase, Seison, que quiere decir limpiar, se inspeccionó con un supervisor que se realizaran limpiezas diarias y se buscara mantener el orden establecido inicialmente para eliminar desde la raíz la causa del desorden. Por otro lado, en la tercera fase, Seiketsu, que significa estandarizar, se documentaron los métodos bajo los cuales se iban a trabajar bajo los procedimientos previamente planteados. Finalmente, en Shitsuke, se organizó con los encargos acerca de las medidas que se tomarían para el cumplimiento de las 5S y dar seguimiento de forma interna de forma esquematizada.

Herramienta 2: Modelo ABC

Ya que el modelo ABC permite realizar la relación entre los productos o insumos, su precio unitario y la demanda [9], se usó con el propósito de colocar los materiales de mayor rotación y valor en un lugar más próximo a la salida del almacén. Para la organización del modelo ABC, se empleó primero un diagrama de Pareto que pudiera

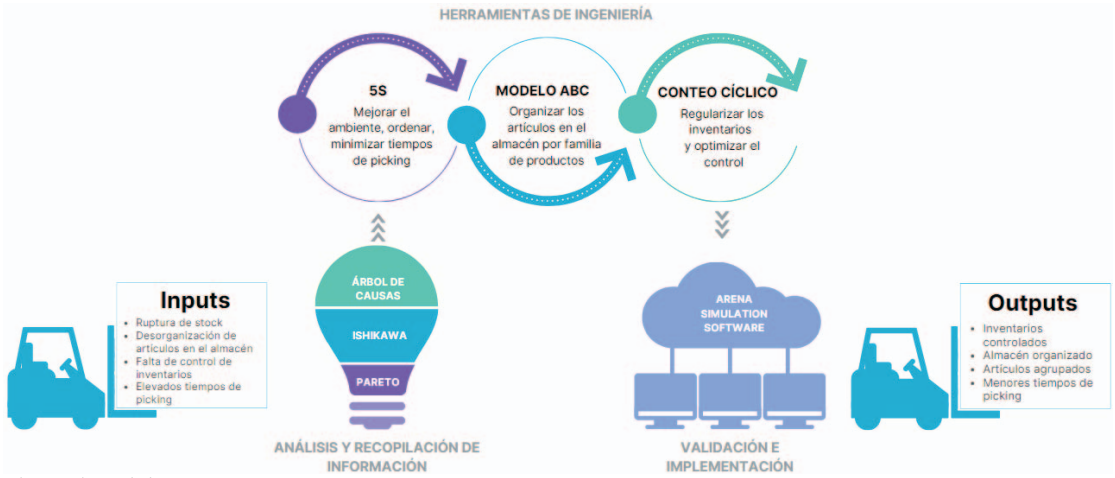


Fig. 1. Diseño de la propuesta

identificar los grupos de productos que pertenecieran a los grupos A, B y C, siendo los productos A con mayor valor y una presentación del 25.81% del inventario, los productos tipo B con un total del 31.18% del inventario y los productos C con menor valor que representaban el 43.01% total del inventario. Este análisis permitió que se encontraran aquellos productos a los que se les haría un mejor control, así como también una asignación dentro del layout del almacén que permitiera realizar esta tarea de forma más sencilla.

Herramienta 3: Conteo cíclico

Al contar con stock de productos que no coincidía con los registros de inventario, se optó por realizar el conteo periódico del inventario físico en el almacén basado en la actividad de venta o importancia de los artículos, lo cual ayudó a poder evitar el inventario erróneo de los artículos del almacén, así como la ruptura de stock [10]. Se encontró distintos tipos de desbalances en los inventarios tales como: falta de existencias, error en registro de saldos y consumos, información no registrada y productos no encontrados en el inventario. La asignación que se le dio a los conteos de inventario fue bajo lo estructurado en el modelo ABC, ya que esto se realizó en base a los costos del almacén y, por tanto, la relevancia monetaria que tienen. Dentro del total de 117 SKUS encontrados, solo 93 estaban registrados con stock.

TABLA I. ANÁLISIS DE SKUS

Tipo SKU	Total SKUS	% en cantidad	% valorizado
A	24	25.8%	80.47%
B	29	31.2%	15.48%
C	40	43.0%	4.05%

Se definió como política realizar inventarios de formar semanal de la siguiente forma: para los productos tipo A, el inventario es 5 SKUS cada semana, de tal manera que se cubra todos los productos A en el periodo de un mes. Esto se repetirá todos los meses para asegurar que no tengan desviaciones. Para los productos tipo B, se definió el conteo de tres SKUS todas las semanas por muestreo aleatorio y sin repeticiones en los conteos, lo cual generaría un ciclo completo luego de 10 semanas. Por último, los productos tipo C de definieron con un conteo de dos SKUS por semana también de forma aleatoria y sin repeticiones por ciclo, lo cual daría un total de 20 semanas para poder finalizar el conteo total de los SKUS. Por otro lado, para los indicadores del inventario se estableció lo siguiente.

TABLA II. INDICADORES DE INVENTARIO

Indicador	Fórmula	Descripción
Exactitud de inventarios	(Conteo real del inventario/Stock registrado) * 100%	Conocer la certeza de la gestión del inventario
Rotación de inventarios	(Valor de inventario en soles/ valor promedio del inventario)	A mayor valor obtenido, mayor rotación de inventario se indica
Promedio de pérdida de stock	(Total de unidades faltantes/total de unidades del inventario)	cantidad promedio de unidades que no se encuentran registradas y físicamente no encontradas

IV. Validación

A. Escenario de validación

Para el proceso de la validación, se procedió a simular el modelo inicial y la mejora por medio del uso del software Arena, el cual permite simular procesos con eventos discretos, analiza las medidas de desempeño y evalúa posibles cambios para encontrar el escenario que optimice el modelo [11]. Para poder ratificar la viabilidad de la propuesta se emplearon dos simulaciones que presentaron la secuencia de los procesos de picking de dos escenarios: antes de la implementación y después de la implementación.

B. Descripción y alcance del sistema

Dentro del sistema se encontraron dos tipos de variables:

- Variables controlables: Comprendidas en su mayoría por la cantidad de recursos empleados dentro del proceso de picking, los cuales variaron según la necesidad y requerimiento del sistema.

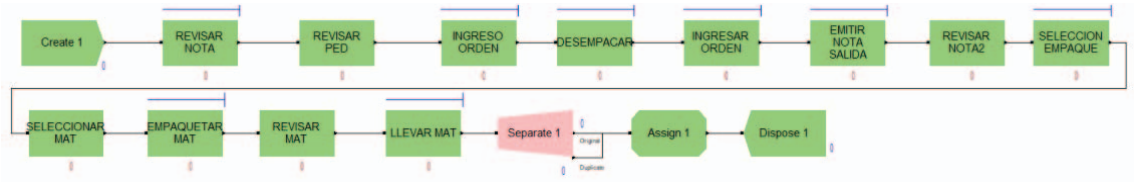


Fig. 2. Simulación en Arena luego de la implementación

- Variables no controlables: Constituidas a partir de la caracterización de tiempos y resultado de la dinámica del proceso. Se tienen los retrasos, demoras, interrupciones y tiempos improductivos como los mayores ejemplos en este tipo de variables.

El modelo presentado contempla la mejora realizada al sistema para la optimización de tiempos de picking. El objetivo de realizar esta simulación fue comprobar que se pudiera obtener por lo menos una reducción del tiempo total del proceso de 25%. Esta reducción debería estar ligada al orden implementado en el almacén bajo el método 5S, la organización de los productos realizada con el modelo ABC y prevenir la ruptura de stock con el conteo cíclico.

Para la simulación de los modelos antes de la implementación y después de la implementación se realizaron un total de 126 replicaciones en el sistema bajo la herramienta de arena Output Analyzer.

TABLA III. INDICARDORES DE MEJORA

Causa	Indicador	Actual	Objetivo	Mejora
Pérdida de tiempo por falta de organización de materiales	Tiempo de picking en minutos	69.47	55	61.87
Desorden en el almacén	Tiempo de espera en minutos	2.8	1	2.59
Usuario ocupado para el ingreso de orden	Tiempo de espera en ingreso de orden en minutos	1	1	0

.

V. DISCUSIÓN

A continuación, se realizó el análisis de escenarios, el cual estuvo enfocado sobre la base de los segmentos, productos y datos relacionados con el caso de estudio. De la misma forma, tuvo como finalidad demostrar que el proceso implementado es replicable en cualquier situación.

Debido a esto, se tomó en consideración el número total de materiales, el cual ascendía a 90 entre las operaciones de recepción y despacho, agrupados en 20 familias distintas. Asimismo, se tomó tiempos durante 2 semanas, considerando tiempos productivos e improductivos. Dichos tiempos, estaban divididos, después de la mejora, en operativos y de aseguramiento de la calidad con la finalidad de mantener una correcta continuidad en la acción. También, se dio por hecho que el principal problema fue el problema de limpieza y orden del área, obsolescencia de materiales y el déficit de tiempos de picking, los cuales fueron resueltos mediante la aplicación de las 5s, modelo ABC y conteo cíclico.

En base a lo precitado, se efectuó un comparativo con la situación inicial encontrada en empresas poseen una bodega industrial que desempeña la labor de picking, el cual atendía un total de 81 productos recibidos y despachados en su situación actual. Además, presentó como principal contratiempo los altos tiempos de picking producto de múltiples variables como el diseño interior o problema de la disposición pasillos de configuración. en una zona de picking. Además, el diseño de la instalación, que se refiere a la decisión de dónde ubicar físicamente los distintos departamentos [14]. Debido a esto, se pudo comprar las variables encontradas para ambos casos con lo cual se logra afirmar que son similares y que el modelo de estudios planteado en el caso debería conseguir resolver el problema encontrado en el modelo comparado. En adición, los problemas de ambos modelos radican en la misma raíz y mantienen procesos que se desenvuelven de maneras similares.

VI. CONCLUSIONES

Previo a la implementación del modelo 5S en el almacén, se obtuvo un tiempo máximo total de 95.25 minutos del proceso total de picking del producto y posterior a la implementación, se pudo obtener hasta un máximo de 87.25 minutos, lo cual pudo, en el escenario de emplear los tiempos máximos en cada subproceso, se observó una mejora de 8.4% con respecto al tiempo inicial.

La implementación de las herramientas en el presente caso de estudio logró un impacto representativo respecto a la minimización de tiempos de picking, aporte más significativo. Además, logró que se tuviera mayor espacio libre dentro de las zonas para circulación del personal, sino que también ayudó a que se desarrolle una mejor estructura de orden dentro del almacén y no haya impedimentos al momento de tomar los artículos del pedido o se encuentre basura dentro de los distintos espacios del almacén. De la misma forma, ayudo de depurar los elementos carentes de valor y clasificarlos según su importancia.

El uso del modelo ABC ayudó a que los productos, sin organización alguna anteriormente, sean agrupados no solo a nivel de familia de producto, sino que también estén en espacios designados dentro del almacén de modo que se permita obtener una mejora en el tiempo de picking. Esto se da como resultado de la designación de espacios para los tipos de productos y, por tanto, el personal se encuentra capacitado para poder encontrar los artículos necesario en el menor tiempo posible.

Para el caso de estudio presentado, inicialmente, se encontró un total del 93 SKUs registrados con stock y 117 SKUs totales, teniendo un total de 24 SKUs existentes, pero sin stock registrado ni control en el sistema. Este problema, fue generado por la falta de control del inventario, se planteó ser resuelto bajo la metodología de conteo cíclico de la mano con el modelo ABC. Al ingreso de cada nuevo artículo, fue registrado en el sistema y fue designado a una familia de producto (modelo ABC), mientras que luego, según la política de inventario sugerida (conteo cíclico), fue controlado bajo un inventario por subgrupo y de este modo se pudo prevenir la pérdida de SKUs y ruptura de stock dentro del almacén.

Finalmente, se demostró que el proceso de picking es más eficiente cuando se tiene el número necesario de operadores para el proceso, dos operadores en este caso. De la misma manera, el número de equipos indispensables para realizar de manera correcta la tarea, siendo el caso, una computadora en el área de almacén para efectuar el ingreso al sistema de inventario del almacén para entradas y salidas de productos. Cabe mencionar, que las medidas anteriormente presentadas minimizaron significativamente los tiempos improductivos del proceso de picking.

REFERENCIAS

[1] N. J. Perdomo & B. A. Trujillo "Evaluación del estado actual de desarrollo del sistema de logística en algunas entidades hospitalarias de la ciudad de Bogotá". Tesis de especialización, Universidad EAN, 2012.

[2] Gómez Kou, J. M., & Domínguez Lozada, D. A. "Implementación de la Metodología 5S en el área de Logística del Hospital Teodoro Maldonado Carbo" Universidad de Guayaquil, 2018.

[3] Asencio Cristóbal, Luis, G. Ascencio, and L. Robles, "El inventario como determinante en la rentabilidad de las distribuidoras farmacéuticas," RETOS. Revista de Ciencias de La Administración y Economía, 2017.

[4] U. Dharmapriya and A. Kulatunga, "New Strategy for Warehouse Optimization -Lean warehousing," In Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2011.

[5] M. Manzano Ramírez and V. Soler" Lean Manufacturing: Implantación 5S" 3C Tecnología, pp. 16–26, 2016.

[6] R. Wilder and Duque, "Análisis e implementación del sistema ABC en el inventario agrícola de una planta de producción de alcohol," 2019.

[7] Donoso Muñoz, T. A., & Pérez Morante, M. "Modelo para la mejora del proceso de picking mediante Lean Warehousing y conteo cíclico en el sector farmacéutico", 2021.

[8] G. Lazo Córdova. "Propuesta de Mejora de la Gestión de Almacenes para la Optimización de KPI´ S en la Empresa Latinoamericana de Envases EIRL", 2018.

[9] W. Rivera Duque, "Análisis e implementación del sistema ABC en el inventario agrícola de una planta de producción de alcohol" Universidad Santiago de Cali, 2019.

[10] C. Lee, "Demand Chain Optimization: Pitafalls and Key Principles", Evant White Paper Series, 2003.

[11] N. Silva Chorique, "Uso de software arena para la simulación de colas de las operaciones de carga y descarga del área de almacén del operador logístico Alcosa", 2021.

[12] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].

[13] M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

[14] M. Arango, C. Zapata y J. Pemberthy, "Reestructuración del layout de la zona de picking en una bodega industrial." Revista de Ingenieria, , vol 32, pp 54–61, 2010.

Reduction of order delivery time using Kanban, TPM and 5S in a Peruvian textile factory. An empirical review.

Reducción del tiempo de entrega de pedidos utilizando Kanban, TPM y 5S en una fábrica textil Peruana. Una revisión empírica.

Francesca Maria Jarufe-Majluf
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Perú
20170768@aloe.ulima.edu.pe
ORCID 0000-0001-8832-7830

Alvaro Paredes-Carrasco
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Perú
20171142@aloe.ulima.edu.pe
ORCID 0000-0002-0715-6169

Alberto Flores-Perez
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Perú
alflores@ulima.edu.pe
ORCID 0000-0003-08130662

Martin Collao-Diaz
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Perú
mcollao@ulima.edu.pe
ORCID 0000-0001-6874-4629

***Abstract*— The importance of reducing delivery times is vital for customer loyalty and the reduction of losses due to cancellation of orders, this being the problem that was developed in the investigation. After recollecting the data, it was observed that the main causes of delays are in the production area, so, using the 5S, Kanban and TPM tools, it was possible to attack the different problems that were found in the company under study. and thus productivity and efficiency were improved, validating the results in the Arena simulation software, not only was it concluded that the different tools used were able to mitigate the eventualities of the current state of the factory, but also proceeded to simulate 3 parallel different scenarios that could occur in the company, obtaining results similar to our first simulation, thus validating that these improvements not only apply to the current state of the company but also to possible future scenarios.**

Keywords—Textile Industry, 5S, Kanban, Preventive Maintenance, Time Reduction

***Resumen* — La importancia de reducir los tiempos de entrega es vital para la fidelización de los clientes y la disminución de pérdidas por cancelación de pedidos, siendo este el problema que se desarrolló en la investigación. Luego de recolectar la información, se observó que los principales causantes de los retrasos se encuentran en el área de producción, por lo que, empleando las herramientas 5S, Kanban y TPM, se pudo atacar los distintos problemas que se encontraron en la empresa en estudio y así se mejoró la productividad y la eficiencia, validando los resultados en el software de simulación Arena, no solo se llegó a la conclusión de que las distintas herramientas empleadas pudieron mitigar las eventualidades del estado actual de la fábrica, sino que se procedió a simular paralelamente 3 escenarios distintos que podrían darse en la empresa, obteniendo resultados similares a nuestra primera simulación, validando así que estas mejoras no solo aplican para el estado actual de la empresa sino también a posibles escenarios futuros.**

Palabras claves — Sector textil, 5S, Kanban, Mantenimiento Preventivo, Reducción de tiempos

I. Introducción

La industria textil es clave en el Perú; contribuye al crecimiento del sector manufacturero con un importante aporte, las exportaciones de artículos relacionados con esta industria han presentado un crecimiento considerable en los últimos años [1]. Asimismo, genera una gran cantidad de empleo, puesto que, en su mayoría, no requiere de mano de obra especializada para realizar las tareas del sector. Inclusive impulsa a otros sectores, ya que demanda los insumos generados para poder transformarlos en productos textiles; dentro de los sectores beneficiados están: el sector agrícola, ganadero, químico, etc. En el Perú, las estadísticas de la Dirección Nacional del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE), referidas a las micro y pequeñas empresas [MYPES], muestran que la participación de las MYPES en el PBI ha sido del 42% y han representado el 98% del total de empresas en el Perú [2] y el 80.96% de la población económicamente activa [PEA] [3].

Actualmente, el sector textil aporta un 1,1% del PBI peruano hablando solo de la elaboración de tejidos y vestimentas. Esto debido a que, esta actividad requiere de mucha mano de obra (se estima que 424 mil personas) y ha permitido la constitución de micro, pequeñas y medianas empresas (MIPYMES) y grandes empresas que ascienden a 37,000 mil empresas aproximadamente. [4]

Por ello, se eligió un caso de estudio que permita la posibilidad de, a través de una propuesta de mejora,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00020

identificar una problemática en este contexto y plantear una solución. Esto se realizó mediante la proposición de una combinación de las herramientas Kanban y 5S y complementar con Mantenimiento Productivo Total, o TPM por sus siglas en inglés. A raíz de ello, se buscó reducir el tiempo de entrega de pedidos en un 55,56% para, de esta forma, estar dentro del tiempo de entrega promedio del sector y cumplir con la política que posee la empresa de que las pérdidas por cuestión de ventas anuales no deben superar el 4% de los ingresos totales.

Este estudio está dividido en estado del arte, contribución validación y conclusiones.

II. Estado del Arte

Para el presente estudio, se utilizaron los siguientes conceptos:

A. Lean Manufacturing

Lean Manufacturing es un sistema de organización de trabajo que se enfoca en la mejora del sistema productivo. Para lograrlo, elimina las actividades que no aportan valor tanto al proceso como al cliente [5]. Esta metodología consta de un conjunto de herramientas que permiten tener una producción mucho más efectiva y eficaz, basándose en la optimización de los recursos.

B. 5S

Las 5S es una herramienta nacida en japón, que nos permite eliminar lo innecesario de un proceso para así mejorar la productividad enfocándonos en lo importante. Cada S indica una acción: Seiri (Clasificación), Seiton (Organización), Seiso (Limpieza), Seiketsu (Estandarizar) y Shitsuke (Mejorar) [6]. Esta herramienta organiza todo el ambiente de trabajo y estandariza el proceso en las estaciones mediante una rutina de orden.

C. TPM – Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en actividades de revisión parcial de forma planificada, en las cuales se ejecutan cambios, sustituciones, lubricaciones, entre otras actividades; antes de que se materialicen las fallas [7]. Busca, a través de un seguimiento constante, prevenir fallas en las máquinas brindándoles el mantenimiento correspondiente. Para llevar un buen plan de mantenimiento preventivo es crucial la capacitación.

D. Kanban

Kanban es una metodología visual para gestionar el trabajo que surgió en Toyota. A inicios de los años 50, Toyota implementó en su producción el sistema denominado "just in time" (justo a tiempo) que en realidad representa un sistema de arrastre. Esto significa que la producción se basa únicamente en la demanda de los clientes y no en la práctica tradicional "pull" de fabricar productos e intentar venderlos en el mercado [8]. Esto se realiza mediante tarjetas, tableros, señales visuales o electrónicas y permite tener un mayor control de la producción y de inventarios.

III. Contribución

A. Base del Modelo

Para poder realizar el modelo de reducción de tiempos, ha sido necesario tener como guía trabajos previos y estudios realizados en distintos países, para así analizar las distintas causas que retrasan la entrega de pedidos y las medidas que se tomaron en conjunto con las herramientas propuestas para reducir esta brecha. Aterrizando en los problemas hallados en la empresa en estudio, algo que se pudo observar fue que, aunque se tengan políticas de mantenimiento y capacitación al personal, se siguen teniendo altos tiempos de demora en la producción por averías en la maquinaria o productos defectuosos.

TABLA I. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PROPUESTA VS. EL ESTADO DEL ARTE

Artículos Científicos	***Mejoras en orden y limpieza***	***Control y mejoras del proceso productivo***	***Mejoras de eficiencia y calidad***
Ashaury, H., Prabowo Sitepu, A. & Renaldi, F. (2021)			QA
Singh Ahuja, I. & Singh, H. (2018).	5S	JIT	TPM, QCC, TQM
Ashok Kumar, M. et. al (2020).	5S	JIT, Kanban	OEE
Deshmukh, G., Ramesh, C., & Mona, G. (2017)	5S	Kanban, VSM, Kaizen	
Yichalewal, G. Kitaw, D. & Jilcha, K. (2019).		Kanban, VSM, JIT, Poka Yoke	TPM
Propuesta	5S	Kanban	TPM

B. Modelo Propuesto

El modelo propuesto tuvo como objetivo utilizar herramientas de *Lean Manufacturing* para acelerar el tiempo de producción, volviendo el proceso más eficiente y reduciendo el tiempo de entrega de pedidos. Es importante mencionar que, el modelo se centró solo en el proceso productivo, esto no incluye el proceso de abastecimiento ya que, participan muchos actores y factores externos y no es posible mantener todo el proceso bajo control.

C. Componentes del Modelo

1) Componente 1: Diagnóstico de la Situación Actual

Primero se realizó el análisis de la situación actual de la empresa, esto con el fin de conocer la realidad de la fábrica, identificar brechas, puntos fuertes y débiles, puntos de mejora y causas de los principales problemas. Para ello, se realizó una serie de acciones: se recolectó la data de la empresa a través de visitas a la fábrica, entrevistas con jefes y se solicitó acceso a repositorios propios de la empresa, para conocer a fondo los indicadores que manejan hasta el momento.

Luego, se realizó el benchmarking con un mercado nacional e internacional y se investigó en trabajos científicos, situaciones similares. A través de una serie de herramientas de ingeniería como: VSM, Diagrama de Pareto, flujos, etc., se logró compilar toda la información y estructurarla de la mejor manera. Así, se identificó el principal problema, las causas a atacar y propuestas de solución con fundamento.

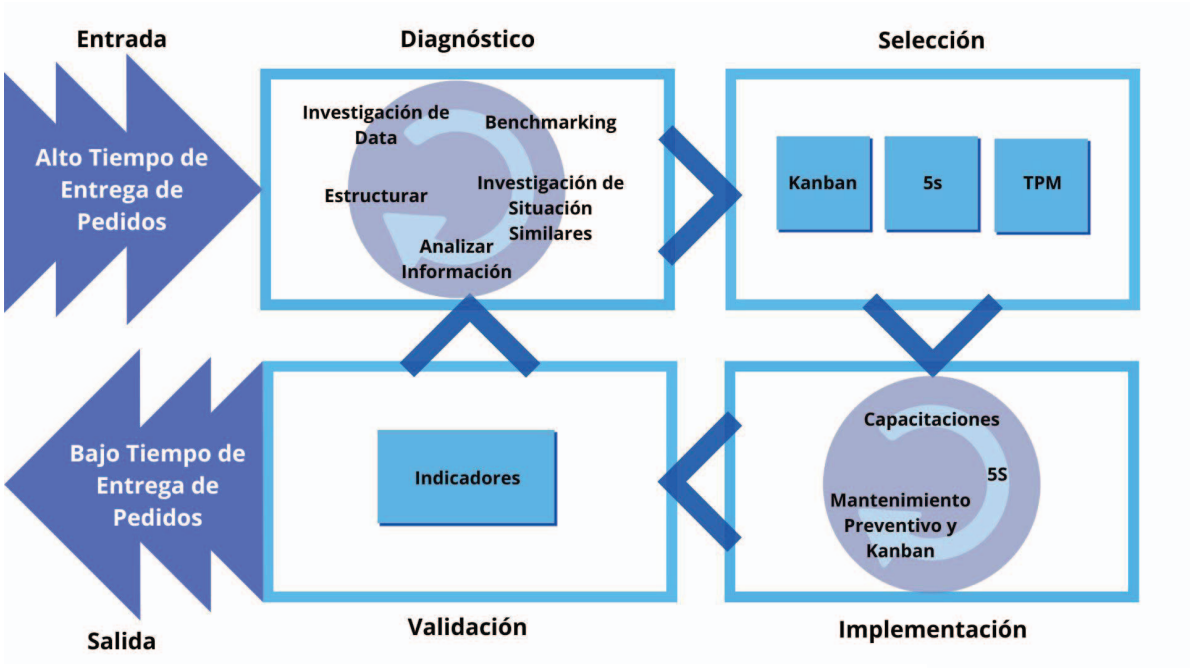


Figura I. Modelo propuesto para reducir el tiempo de entrega de pedidos

2) Componente 2: Selección de Herramientas

Luego, se seleccionaron las herramientas de *Lean Manufacturing* que se consideraron que podrían atacar a los principales problemas y mitigarlos. Estas fueron: 5S, para

A través de estas herramientas se pretendió tener un espacio de trabajo más ordenado, donde cada cosa tenga su lugar y a simple vista haya armonía en la planta; además, se puede tener un control de la producción, conocer el estado de pedidos y focalizarse en las prioridades. También, al tener un plan de mantenimiento estructurado, se esperaba que los operarios perdieran menos tiempo con máquinas fuera de servicio, podrían enfocar sus esfuerzos en la producción y habría una mayor disponibilidad de máquinas

3) Componente 3: Implementación del Modelo

Para la implementación del modelo, primero fue necesario realizar capacitaciones sobre todas las herramientas que se van a utilizar, para que así, todo estén alineados y conozcan los procedimientos.

La implementación se realizó en dos etapas principales. La primera fue implementar la metodología 5S para ordenar las áreas y procesos de la fábrica. Y una vez que estuvo funcionando sistemáticamente, se realizó la segunda etapa. Aquí, se implementaron, paralelamente las herramientas Kanban y Mantenimiento Preventivo. Cabe recalcar que, la etapa 1 no finalizó con el inicio de la etapa 2, sino que son acumulativas. Una vez que la etapa 2 estuvo estructurada y funcionando correctamente, las etapas 1 y 2 dejaron de llamarse etapas para formar parte de un proceso integrado de las 3 herramientas, cada una enfocándose en mitigar distintos aspectos en la fábrica, pero dirigidos hacia la misma meta.

4) Componente 4: Validación del Modelo

ordenar y limpiar el área de producción de la fábrica, Kanban, para tener un flujo claro de los pedidos que entran y el estado en el que se encuentran y el Mantenimiento Preventivo, para tener un plan de mantenimiento claro y conciso que evite averías en las máquinas.

Para realizar la validación del modelo, se utilizó el simulador ARENA. Este permitió visualizar cómo la planta interactúa bajo este nuevo modelo.

Una vez ejecutado el modelo, el programa arrojó los nuevos resultados de tiempos en un informe. Esta información sirvió de base para hacer la comparación de indicadores, permitiendo identificar si ha habido un progreso respecto a la reducción de tiempos de entrega de pedidos.

D. Indicadores

Se seleccionaron los siguientes indicadores para validar que nuestra propuesta de mejora causa un impacto positivo en la empresa:

Indicador 1: Índice de máquinas defectuosas por mes

$$\frac{Número\ de\ máquinas\ con\ desperfectos}{mes}$$

Interpretación: El objetivo de este indicador es evaluar cuántas máquinas sufren desperfectos al mes para generar un historial y evaluar si el indicador aumenta, disminuye o se mantiene igual en el tiempo.

Indicador 2: % de productos defectuosos.

$$\frac{Número\ de\ productos\ defectuosos}{Total\ del\ productos}$$

Interpretación: Este indicador tiene como objetivo medir el porcentaje de productos que tienen desperfectos en todo el proceso. A fin de identificar una reducción en el % de defectuosos.

Indicador 3: Tiempo de entrega del pedido [9].

$$Tiempo\ total\ del\ pedido\ (en\ días)$$

Interpretación: Mide el tiempo desde el que se genera el pedido hasta que se entrega al cliente.

Indicador 4: % Cumplimiento de entregas

$$\frac{Número\ de\ entregas\ cumplidas\ a\ tiempo}{Número\ de\ pedidos\ generados}$$

Interpretación: El indicador más importante, ya que éste es el problema principal por resolver en la empresa. Mide el porcentaje de entregas de pedidos que se cumplen a tiempo.

IV. Validación

A. Alcance del Sistema

El alcance del sistema va desde la cotización de pedidos, dando por hecho que ya se tienen todos los avíos disponibles, hasta el despacho de los pedidos de la fábrica (momento en el que salen los pedidos de la fábrica), ya que la distancia a la que se debe realizar la entrega ya sea a nivel nacional o internacional, es muy variable.

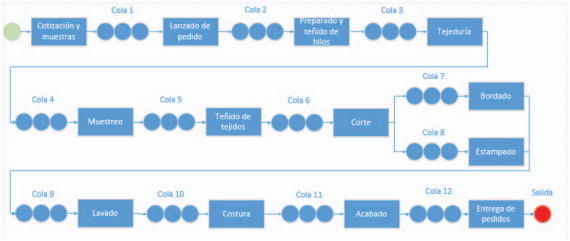


Figura II. Representación gráfica del modelo mejorado

B. Variables de Entrada

Se realizo una toma de tiempo de las órdenes ingresadas al simulador, para poder determinar el porcentaje de cumplimiento de estas y los tiempos de entrada 0079 salida en el sistema.

TABLA II. VARIABLES CONTROLADAS Y NO CONTROLADAS

Variables Controlables	Variables No Controlables
Horas Laborables	Tamaño del pedido
Cantidad de Operarios	Tiempos de los procesos
Máquinas de la empresa	Tiempo entre llegadas
	% de cumplimiento de pedidos

C. Restricciones y Periodo Aplicable al Simulador

Se está trabajando dentro de la línea de producción de los polos textiles, representado por las órdenes. Por lo tanto, se correrá la simulación en base a este producto.

Luego de elaborar la simulación, se pasó a ejecutarla y se registró como primer indicador de mejora que en el estado inicial se tenían 12 órdenes ingresadas al sistema, de las cuales únicamente 4 eran atendidas hasta el despacho. Con la mejora, de las 12 órdenes que ingresan al sistema, 8 órdenes son atendidas hasta el despacho. Esto significa una mejora del doble con respecto al estado inicial.

En base a la simulación realizada en el simulador ARENA v16 se pudo obtener los siguiente es resultados:

1. Con respecto a la cantidad de órdenes atendidas, el siguiente cuadro muestra una notable mejora con respecto al estado inicial.

TABLA III. CUMPLIMIENTO ESTADO INICIAL VS ESTADO MEJORADO

	Órdenes registradas	Órdenes atendidas	% cumplimiento
Inicial	12	4	30%
Mejorado	12	8	60%

2. Para uno de los cálculos más importantes, la cantidad de días que una orden pasa en el proceso productivo, obtuvimos una mejora notable de 3 días con respecto al estado inicial.

TABLA IV. TIEMPO EN DÍAS ESTADO INICIAL VS MEJORADO

	Días empleados	Mejora (en días)
Inicial	22	-
Mejorado	19	3

3. De igual manera, al analizar los resultados registrados por el output analyzer, se determinó que la aplicación de la metodología TPM logró aumentar en 16,17% la eficiencia general de las máquinas en la organización, pasando de 68.21% a 84.38% al finalizar el tercer mes del piloto [10]. De manera similar, aplicar la metodología TPM en el presente trabajo, produjo una mejora del 62.5% en la eficiencia de las máquinas de la planta.

4. Se tiene que "el tiempo de entrega del sector era de 15 días hábiles" [11]. Comparándolo con los resultados de la simulación, podemos confirmar que, si bien no se pudo llegar al tiempo del sector, se logró una mejora significativa de los tiempos pasando de 27 días útiles a 22.41 días.

V. Discusión

A. Nuevos Escenarios vs Resultados

Adicionalmente a la simulación realizada, se realizaron 3 escenarios diferentes para demostrar que nuestra propuesta es aplicable a distintas circunstancias.

El primer escenario, muestra un proceso parecido al inicial, pero se considera solo el bordado que toma entre 16 y 24 horas. El segundo escenario, considera solo el estampado que puede tomar unas 40 horas. Y el tercer escenario, en lugar de considerar el bordado y el estampado como procesos simultáneos, los considera como procesos lineales; uno después del otro.

Todos los escenarios con condiciones similares de recursos y tiempo de evaluación. Los resultados son los siguientes:

Tabla V. Resultados de los escenarios

	Órdenes registradas	Órdenes atendidas	% cumplimiento	Días empleados	Mejora respecto al inicial (días)
Inicial	12	4	30	22	-
Mejorado	12	8	60	19	3
Escenario 1	12	8	60	18.6	3.4
Escenario 2	12	8	60	19.5	2.5
Escenario 3	12	8	60	20.3	1.7

En los 3 escenarios se puede ver que, el cumplimiento de las órdenes se ha mantenido con una mejora del 60% respecto al estado inicial; sin embargo, hubo una mejora en los días empleados en cumplir con una orden, mostrando que dependiendo del proceso que se siga, los indicadores pueden mejorar o empeorar respecto al estado mejorado; sin embargo, siguen siendo mejor que el estado inicial.

B. Trabajos Futuros

Esta investigación involucró un análisis de distintos *papers* y revistas sobre la implementación de las herramientas Kanban, 5S y Mantenimiento Preventivo y sus aplicaciones específicamente en la industria textil [12]. En base a los resultados e investigaciones que se obtuvieron, el presente trabajo podría utilizarse como ejemplo para futuras investigaciones. La implementación de las herramientas en la fábrica textil en estudio son producto de una gran recopilación de investigaciones pasadas, extrayendo lo mejor de cada una, así como las prácticas puestas en marcha para cada herramienta implementada; es por lo que, el presente trabajo puede servir como base para futuros investigadores que no necesariamente estén en la industria textil, ya que la mayoría de las herramientas empleadas pueden replicarse en otros sectores debido a su flexibilidad [13].

Otro punto de vista a futuro sería la drástica mejora en tiempos de tintado de hilos, los tiempos mejorados superaron la expectativa puesto que al implementar el tablero Kanban y una fase previa de muestreo, se asegura que el 100% de la materia prima sea tintada de la manera correcta y no se deba incurrir en reprocesos que significan 18 horas perdidas.

Para abordar el tema principal de la presente investigación (Mejora en tiempos de entrega) es necesario entender el proceso completo de la fábrica [14] y realizar constantes visitas y reuniones con los jefes y supervisores, para así recibir un input directo sobre cuáles son los principales causantes de dichas demoras y evaluar que herramientas podrían aportar una mejora al proceso entero, aunque únicamente sean aplicadas a una parte del proceso en sí [15].

VI. Conclusiones

En conclusión, la implementación de las herramientas propuestas (5S, Kanban y Mantenimiento Preventivo) logró validar nuestra motivación principal, reduciendo el tiempo de entrega de pedidos mediante la validación de la simulación en el software Arena a 22,41 días útiles, representando una mejora de 4.59 días con respecto al estado inicial de la fábrica.

Si bien no pudimos alcanzar el tiempo promedio de entrega de pedidos del sector, siendo estos 15 días útiles, comprobamos que aplicando correctamente las herramientas de ingeniería se puede mejorar el tiempo de cualquier proceso.

Las horas perdidas por los diferentes reprocesos, sobre procesos y averías se redujeron de 88 horas semanales a un total de 14,5 horas semanales, siendo la herramienta más influyente el tablero Kanban.

Asimismo, se logró reducir el promedio de averías a la semana de 8 a 3 averías, gracias a la herramienta TPM.

Finalmente, se pudo validar que las herramientas 5S, Kanban y TPM pudieron mejorar tanto los sobre procesos como los reprocesos y las averías, respectivamente.

Referencias

[1] D. Carrillo, Diagnóstico del Sector Textil y de la Confección, Lima, 2010.

[2] Deshmukh, G., Patil, C. R., & Deshmukh, M. G. (2017, January). Manufacturing industry performance based on lean production principles. 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947977

[3] Deshmukh, G., Patil, C. R., & Deshmukh, M. G. (2017, January). Manufacturing industry performance based on lean production principles. 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947977

[4] Neyra, J., Muñoz, J., Eyzaguirre, J., & Raymundo, C. (2020). 5S Hybrid Management Model for Increasing Productivity in a Textile Company in Lima. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25629-6_151

[5] Acevedo Rubles, Juan Pablo. (2016). *Aplicación de Filosofía Lean Manufacturing Para Optimización de Tiempo de Ciclo en la Industria Textil*. https://rei.iteso.mx/xmlui/themes/Mirage2/bookview/template.html?path=/bitstream/handle/11117/6054/Tesis%20Documento%20Final%20%28Textil%29%20Juan%20Pablo.pdf?sequence=2&isAllowed=y#page=12

[6] Goshime, Y., Kitaw, D., & Jilcha, K. (2019). Lean manufacturing as a vehicle for improving productivity and customer satisfaction. International Journal of Lean Six Sigma, 10(2). https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2017-0063

[7] Salem, R., Musharavati, F., Hamouda, A. M., & Al-Khalifa, K. N. (2016). An empirical study on lean awareness and potential for lean implementations in Qatar industries. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, 82(9–12). https://doi.org/10.1007/s00170-015-7421-7

[8] Bolaños Padilla, W. H. A. N. D. A. S. C. H. E. N. E. I. D. E. R., & Ordoñez Rebolledo, V. A. N. E. S. S. A. (2013). Propuesta De Mejoramiento Productivo Para Una Empresa De La Industria Panificadora.

[9] Santivañez Enciso, M., & Saroli Orcottoma, L. (2021). Modelo de Manufactura Esbelta Adaptada a la Reducción de Tiempo de Entrega de Pedidos en una Pyme Peruana del Sector Textil-Confección. Repositorio Académico UPC. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/651892/Santiva%c3%b1ez_EM.pdf?sequence=3&isAllowed=y

[10] Violeta, A., Mejía Quispe, L., & Milagros, M. (2021). Mejora en la entrega de pedidos de una mype del sector textil peruano, mediante un modelo Lean. Repositorio Académico UPC. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/655417/AntonieteV_L.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Yashini, J. . (2020). An Analysis on Minimization of Product Error (Poka-Yoke) and Excess Work in Progress (TPM & OEE) in Textile Industry. International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 3(9), 17–22. https://doi.org/10.47607/ijresm.2020.27

[11] Agustiady, T. K., & Cudney, E. A. (2018). Total productive maintenance. Total Quality Management & Business Excellence, 1–8. https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1438843

[12] H. Quispe-Roncal, M. Takahashi-Gutierrez, E. Carvallo-Munar y I. Macassi-Jauregui, Combined model of SLP and TPM for the improvement of production efficiency in a MYPE of the Peruvian textile sector, Lima, 2020.

[13] Ramirez-Mitma, M., Rojas-Garcia, J., Torres-Sifuentes, C., & Raymundo, C. (2021). A Strategic Lean Procurement Model Based on Supplier Appro

val to Reduce Unplanned Downtime in a Textile Small and Medium-Sized Enterprises. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57548-9_37

[14] Vardhan, S., Gupta, P., & Gangwar, V. (2018, March). The impact of Quality Maintenance Pillar of TPM on manufacturing performance. 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM). https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093741

[15] A. Zuluaga-Mazo, R. A. Gómez-Montoya, y S. A. Fernández-Henao, «Indicadores logísticos en la cadena de suministro como apoyo al modelo Scor», *Clío América*, vol. 8, n.º 15, pp. 90–110, ene. 2014.

Study of the cocoa supply chain in the region of Bocas del Toro, Panama

Estudio de la cadena de suministro de cacao en la región de Bocas del Toro, Panamá

Nuvia Gisela Martez
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
0000-0002-9425-898X

Danilo Toro Lozano
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
danilo.toro1@utp.ac.pa

María Luisa Singh Gustavino
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
0000-0003-2881-6768

***Abstract* — This paper presents the results of an exploratory study that seeks to identify the role of the actors in the cocoa supply chain in the Bocas del Toro region, Panama, intending to increase the competitiveness and income of producers. The researchers conducted three site visits to collect primary data (qualitative) through a questionnaire and an interview with cocoa producers and business people dedicated to the transformation and marketing of cocoa beans. The bibliographic review served to learn about characteristics of the competitive scenario and national initiatives to promote the strengthening of the sector. The data analysis made it possible to make a first approximation of the structure of the supply chain in the region with the actors that participate in the four links identified (suppliers, producers, manufacturers, and the final consumer). Cocoa producers' perceptions, experiences, and expectations regarding their activity are highlighted. Among the conclusions is that the activity of cocoa cultivation is important but not enough to maintain minimum and sustained income that allows for meeting the basic needs of families dedicated to the product. The most representative actors (state institutions, universities, and businesses) need to understand the need to develop training, seminars, and technical assistance so that cocoa producers can acquire the technical knowledge to meet the national or international market requirements.**

Keywords— Family farming, cocoa supply chain, cocoa demand, organic product

***Resumen* — Este trabajo presenta los resultados de un estudio exploratorio que busca identificar el rol de los actores en la cadena de suministro del cacao en la región de Bocas del Toro, Panamá para aumento de la competitividad e ingreso de los productores. Se realizaron tres giras de campo para la recopilación de datos primarios (cualitativos) por medio de cuestionario y entrevistas aplicados a productores de cacao y a empresarios dedicados a la transformación y comercialización del grano de cacao. La revisión bibliográfica sirvió para conocer aspectos del escenario competitivo e iniciativas nacionales de impulso al fortalecimiento del sector. El análisis de los datos permitió realizar una primera aproximación de la estructura de la cadena de suministros en la región con los actores que participan en los cuatro eslabones identificados (proveedores, productores, fabricantes y el consumidor final). Se destacan las percepciones, experiencias y expectativas de los productores de cacao en cuanto a la actividad que desempeñan. Entre las conclusiones se tiene que la actividad de cultivo de cacao es importante pero no suficiente para mantener ingresos mínimos y sostenidos que permitan atender las necesidades básicas de las familias dedicadas al cultivo de cacao; los actores de mayor representatividad (instituciones del Estado, Universidades y empresarios) necesitan comprender la necesidad de desarrollar capacitaciones, seminarios y asistencia técnica para que los productores de cacao logren adquirir los conocimientos técnicos que permitan mejorar los ingresos al atender los requisitos del mercado nacional o internacional.**

Palabras claves — Agricultura familiar, cadena de suministros de cacao, demanda de cacao, producto orgánico

I. INTRODUCCION

Se reporta [1] que en América Latina y el Caribe (ALC) el cacao (*Theobroma cacao)* es cultivado desde México hasta Brasil con la particularidad de que casi el 70% de la producción global es de tipo familiar [2] y se realiza en ecosistemas de gran biodiversidad. Las consecuencias inmediatas [1] de la Agricultura Familiar (AF) son baja productividad de los cultivos, insuficiente calidad de los granos y discontinuidad en la oferta debido principalmente a las prácticas heterogéneas tanto en la cosecha, en los procesos postcosecha (de secado, fermentado y tostado) y en la distribución lo cual influye directamente en el ingreso que pueden percibir la familia y los productores de pequeña escala dedicados a la producción de cacao.

En Centroamérica el cacao es cultivado por varios grupos étnicos, incluyendo los Ngäbe Buglé y Teribe en Panamá, los Bribri y Cabécar en Costa Rica, Mayangna y Miskitos en Nicaragua-Honduras, y Mayas Mopán y Quekchí en Guatemala y Belice. La prevalencia de grupos étnicos en el cultivo de cacao tiene implicaciones importantes en la adopción de avances tecnológicos disponibles o de la incorporación de innovaciones o nuevas prácticas a lo largo de la cadena productiva ya que, en ocasiones formas diferentes de producir y transformar el grano chocan con las tradiciones y valores de la cultura indígena [3].

En cuanto al mercado del cacao, en ámbito mundial se exportan 3.5 millones de toneladas de cacao. Para suplir esta demanda participan en diferente proporción tres continentes, a saber: África (68%), Asia (17%) y América (15%)[4]. La tendencia es que en los próximos años la demanda de cacao aumentará al integrarse a la cadena de consumo países emergentes como China e India [1]. En 2017 una revisión sobre el estatus, el procesamiento y la cadena de suministro en ámbito global [4] concluye que la demanda de cacao está aumentando y con una previsión de que esta tendencia continúe además, los autores del estudio alertan sobre la necesidad de apoyar a los productores de pequeña escala (AF)

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00021

para que la industria cuente con suficiente suministro del grano. El informe [5] elaborado por la Organización Internacional del Cacao (ICCO por sus siglas en inglés) sobre el mercado del cacao señala que aunque se enfrentan circunstancias adversas por el conflicto bélico (Rusia y Ucrania) la demanda de cacao se mantiene en alta para la primera mitad de la temporada 2021/22. Este dato destaca que, aunque persisten los efectos ocasionados por la pandemia del COVID-19 las economías se han abierto y han impulsado la demanda de productos básicos, entre los que está el cacao.

Comúnmente en el mercado mundial se tienen dos categorías para el cacao en grano [1]: el conocido como "fino o de aroma" proveniente de la variedad denominada Criollo o Trinitario, que ofrece una mejor calidad del cacao [4] y "a granel u ordinario" que proviene de la variedad de árbol Forastero, con alta productividad y resistencia a enfermedades [6]. La clasificación depende de la evaluación de expertos que utilizan una combinación de criterios entre los que están: el origen genético de la plantación, las características morfológicas de la planta, el sabor del grano de cacao, las características químicas, el grado de fermentación, el secado, la acidez y el porcentaje de impurezas, entre otros [7].

El mercado del cacao fino o de aroma es pequeño y altamente especializado con características de oferta y demanda muy particulares [7] con precio especial que varía de 3,000.00 a 4,000.00 dólares por tonelada [1]. Los fabricantes de chocolate fino (*gourmet)* utilizan, en sus recetas tradicionales, granos de cacao fino o de aroma para generar un producto terminado diferenciado de alta calidad y precio relativamente alto. La demanda de este tipo de chocolates ha ido en aumento [1], [8] gracias al cambio en las preferencias de consumo del cliente final (productos orgánicos y sostenibles). El valor en el mercado del cacao fino o de aroma crea expectativas de que el productor de este tipo de cacao recibiría un precio significativamente más alto cuando comparado con lo que se recibe por la categoría de cacao ordinario.

Según datos de la ICCO [7] la participación del cacao fino o de aroma en las exportaciones mundiales de cacao en grano se estiman en alrededor del 12% siendo que la región que produce casi la totalidad de cacao fino ofertado es ALC [1] con el 90% de las exportaciones mundiales. Países como Colombia, Costa Rica, Trinidad y Tobago, Brasil y otros tienen participación entre el 95% y 100% del total de exportación. La **¡Error! No se encuentra el origen de la r eferencia.** muestra el porcentaje de otros países que exportan cacao fino o de aroma a diciembre de 2021 [1],[7]. Se observa que del total de la exportación de cacao en grano que realizó

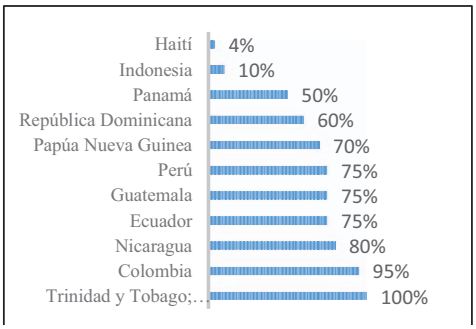


Fig. 1 Países productores que exportan exclusiva o parcialmente cacao fino o de aroma, 2021. Fuente: https://www.icco.org/fine-or-flavor-cocoa/

Panamá la mitad (50%) es clasificado como cacao fino o de aroma.

El mercado consumidor de cacao fino o de aroma está compuesto por países tradicionalmente consumidores de cacao de Europa Occidental (Bélgica, Francia, Alemania, Italia, Suiza y el Reino Unido) así como Japón, mientras que Estados Unidos utiliza este tipo de cacao en menor escala. En ALC países como Colombia, Brasil y México poseen un prometedor mercado interno para el uso de cacao fino o de aroma [7].

En perspectiva, las proyecciones de aumento en el consumo de chocolate, elaborado a base del cacao y de la demanda de granos en general hacen que este cultivo represente una oportunidad para desarrollar estudios que ofrezcan alternativas para el fortalecimiento de la cadena de suministro de esta variedad de cacao, en especial para explotar la biodiversidad y el potencial de crecimiento económico que representa para los países de ALC aumentar la oferta de grano fino o de aroma, especialmente en Panamá en la región de mayor producción de esta categoría de cacao. Este escenario ofrece la oportunidad de crecimiento y obtención de ventajas competitivas [8] a las agrupaciones de agricultores de ALC que sostenidamente logren atender la demanda de cacao fino o de aroma que atiendan las exigencias internacionales de inocuidad, trazabilidad y calidad [1].

En este contexto, se desarrolla la investigación sobre la configuración de la cadena de suministros de cacao, como parte de la primera etapa del proyecto "Sistemas Integrados de Energías Renovables para mejorar la competitividad de Productores de Cacao en la Comarca Ngäbe Buglé" que tiene periodo de ejecución de 2020-2023. Se explora el concepto de gestión de cadenas de suministros, específicamente aplicado al sector cacaotero, a través de un estudio de caso, por tratarse de un tema de carácter exploratorio ya que, son pocos los estudios nacionales asociados a la comprensión de las características de la cadena, las relaciones existentes entre los actores y desempeño competitivo.

Entre las preguntas planteadas están: ¿Cuál es la estructura de la cadena productiva del cacao en la región de Ciliko Creek? ¿Cuáles son los principales actores y el contexto competitivo? ¿Existen oportunidades para mejorar los ingresos y calidad de vida de los productores de pequeña escala de la región? El objetivo planteado fue identificar y verificar el rol que cada uno de los actores tiene en la cadena de suministro del cacao. Identificar dónde es necesario crear capacidades técnicas y condiciones que permitan fortalecer la competitividad y consecuentemente mejorar los ingresos de la agrupación de productores asociados a la cooperativa Solary R.L., en la región de estudio.

II. Gestión de cadena de suministros

A. Aspectos teóricos

La gestión de la cadena de suministros (Supply Chain Management - SCM) es definida como la gestión interna y externa del flujo de informaciones, contratos, materiales y servicios valorizados por el cliente final, desde la fuente de la materia prima hasta que el producto está en manos del consumidor final [9],[10]. Este concepto involucra la gestión de las múltiples relaciones entre organizaciones (proveedores, fabricantes, distribuidores y cliente) que participan en el proceso productivo a través de actividades que agregan valor al producto final [11]. La SCM busca la excelencia en los

procesos prioritarios a lo largo de la cadena mediante la integración de objetivos y metas con la cooperación de los actores en la cadena [12]. Esta visión de realizar y gestionar las actividades es una forma innovadora e integral de gerenciar los negocios y las relaciones entre todos los miembros que participan en una cadena de suministros [13].

La configuración o esquema de una cadena de suministros está compuesta por todos los actores que están vinculados en el proceso productivo y comercial, por tanto, la complejidad de la cadena depende de la cantidad de miembros o eslabones que existen desde la fuente de materia prima hasta que el producto se entrega al consumidor final [2], [13]. Sin embargo, cabe señalar que ni todos los miembros de una cadena de suministros poseen la misma relevancia, por esta razón, es esencial identificar y aumentar la participación de éstos miembros clave [14] para que sean ellos los que promuevan el desarrollo de competencias e induzcan acciones entre aquellos eslabones con menor representatividad o que enfrentan dificultades ya sea, porque poseen una capacidad organizativa menor (tamaño o poder de negociación) o capital social diferente, pero que participan de la cadena y deben ser fortalecidos.

Los cambios en el ambiente competitivo pueden representar amenazas u oportunidades de negocios dependiendo del posicionamiento estratégico adoptado individualmente y como un todo en la cadena. Para lograr consolidar una posición en el mercado nacional o internacional los participantes en los distintos eslabones deben estar aptos a atender las exigencias del consumidor final cumpliendo con los atributos o requisitos que ellos más valorizan lo que consecuentemente aumenta la competitividad y el crecimiento de las ganancias para todos [11].

Desde este punto de vista, la gestión de la cadena de suministros como un todo, asume como necesaria la coordinación [11] y colaboración de los diversos actores involucrados [15], sean entidades gubernamentales y no gubernamentales, los productores, el organizaciones privadas e instituciones académicas y de investigación que a través de alianzas estratégicas [16] pueden, por ejemplo, reforzar áreas de investigación, desarrollar nuevas tecnologías, procesos y productos de valor agregado o innovadores [12], entre otros. Esta colaboración genera beneficios tales como reducción de costos, velocidad de llegada al mercado, servicio al cliente y en especial ganancias para cada uno de los miembros de la cadena y en especial para los productores en pequeña escala. Por tanto, es vital identificar las debilidades en la cadena de suministro del cacao, los actores que participan, las oportunidades de agregar valor, entre otros, para proyectar soluciones que fortalezcan la competitividad por medio de una cadena integrada donde cada actor trabaja colectivamente y no de forma aislada.

B. Características de la cadena de suministros de cacao

La cadena de suministro del cacao está compuesta de una red de actores que prácticamente permanecen invisibles para el consumidor o cliente final [2]. El cacao crudo pasa por una variedad de procesos en cada eslabón, generalmente pasando desde el productor de pequeña escala a centros de acopio o asociaciones que luego las comercializan o procesan, es decir cambia de manos muchas veces antes de convertirse en un producto final como la barra de chocolate o cualquier otro producto elaborado a base de cacao [2], [17].

Debido a su complejidad la cadena de suministro del cacao enfrenta desafíos particulares como la efectiva comunicación a lo largo de la cadena [2] porque participa un número elevado de productores de pequeña escala e independientes, que en su mayoría no tienen idea de cuáles son las características prioritarias o valoradas por el consumidor final. Adicional, al eslabón de distribuidores se les dificulta o les resulta oneroso encontrar una fuente confiable (de cacao fino y orgánico), en las cantidades y la calidad que necesitan [7], para el producto diferenciado de alto valor que demanda el mercado de chocolates gourmet.

En el caso de las agrupaciones o de productores individuales de menor escala no pueden permitirse los costos que involucra realizar investigación y desarrollo o invertir en campañas de marketing, lo que las coloca en una situación de desventaja en el mercado [2]. Para superar esta dificultad el concepto gestión de la cadena de suministro integrada promueve la formación de alianzas estratégicas entre los actores de la cadena para facilitar la innovación y fortalecer la competitividad.

En la cadena se identifican también entidades (actores) que se encargan de regular y evaluar la calidad del grano y de los productos elaborados. En el caso de la exportación participan entidades que otorgan el certificado fitosanitario internacional de exportación, en Panamá el Ministerio de desarrollo Agropecuario (MIDA) cumple esta función. También participan organismos que otorgan otro tipo de certificaciones como la Certificación *Fair Trade* o Comercio Justo que se basa en la cooperación entre productores y consumidores [18].

De forma general, en la cadena de suministros de cacao existen empresas que juegan múltiples roles y otras no participan en el proceso de fabricación del chocolate, por lo que, es difícil predecir una configuración exacta de la cadena de suministro para cualquier producto final en particular. La cadena de suministro desde el productor familiar de pequeña escala hasta el consumidor final generalmente incluye empresas intermediarias, distribuidores, procesadores o fabricantes de gran escala y minoristas [2]. En esta investigación se obtuvo una primera aproximación sobre la configuración de la cadena de suministros de cacao, en la región de Bocas del Toro de forma genérica sin considerar un producto final en particular.

III. METODOLOGÍA

Se trata de una investigación con enfoque cualitativo. Se desarrolla un estudio de caso, descrito por autores [19], [20], que señalan la utilidad del método cuando la investigación es de carácter exploratoria; cuando se busca comprender en profundidad el caso desde la perspectiva del participante. Además, el investigador no tiene control sobre los eventos y examina las características del caso tal como están aconteciendo en el contexto o realidad de los participantes (actores de la cadena de suministro de cacao).

A. Recopilación de información

Se levantaron datos primarios (cualitativos) para determinar algunas características de la cadena de suministro de cacao en la región de estudio (ver Tabla I) utilizando entrevistas y encuesta a productores y secundarios (revisión bibliográfica) para conocer los actores que generalmente intervienen en la cadena de cacao, algunos aspectos del escenario competitivo e las iniciativas que se desarrollan en ámbito nacional para impulsar el fortalecimiento del sector.

TABLA I DATOS PRIMARIOS LEVANTADOS

Datos	Tipo de datos	Técnica utilizada
Información sobre los productores de cacao asociados a la Cooperativa Solarys R.L (16)	• Tiempo de dedicación al cultivo • Hectáreas cultivadas • Especie cultivada • Cantidad cosechada • Comercialización • Distribución • Dificultades	Cuestionario (preguntas abiertas y cerradas)
Información de empresarios que transforman el grano (fabricación de productos)	• Demanda • Precio • Proveedores • Requisitos	Entrevista (Guía)

Se realizaron tres (3) giras de campo, la primera ocurrió en febrero de 2020, antes de la crisis ocasionada por la pandemia del COVI-19; el cuestionario se aplicó en las instalaciones de la cooperativa Solarys R.L. durante reuniones con los productores – socios. En la segunda gira de campo, en agosto de 2021, se visitó una instalación de procesamiento ubicada en la comunidad El Silencio y se conversó con una empresaria dedicada tanto a la producción de cacao como a la transformación de grano de cacao (ver Fig. 2). La tercera gira ocurrió en mayo de 2022 y estuvo enfocada en entrevistar a compradores de granos de cacao para el procesamiento/transformación y a un técnico de la principal cooperativa dedicada a la comercialización de granos de cacao.

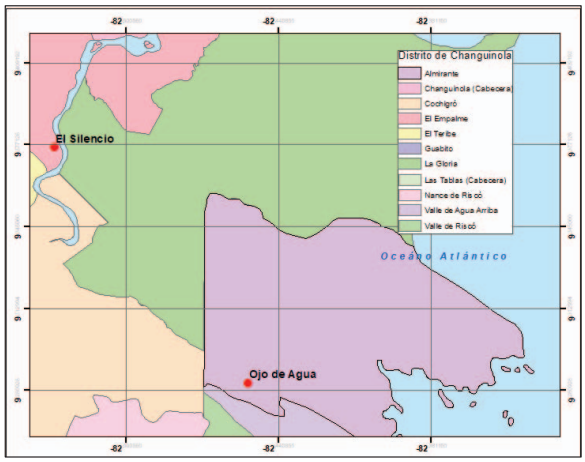


Fig. 2 Representación de los lugares visitados en la segunda gira de campo: Futura planta de procesamiento en la comunidad El Silencio y Finca con espacio para la fabricación de productos a base de cacao (empresa 2) en Ojo de Agua, Almirante

El cuestionario utilizado con los productores de cacao constaba de una serie de preguntas cerradas y abiertas para permitir a los entrevistados que expusieran sus experiencias y expectativas en relación con la actividad productiva que realizan. Consta con secciones sobre datos generales de los productores (edad, escolaridad, ingresos, etc.) y específicos sobre prácticas en los eslabones de producción, comercialización y distribución para obtener la información que permitiera alcanzar el objetivo de la investigación. Para obtener los datos de los empresarios se diseñó una guía con preguntas abiertas relacionadas a los requisitos y demanda de granos de cacao, experiencias y perspectivas del negocio.

B. Población y delimitación del estudio

En el caso de estudio participaron dieciséis (16) productores de cacao de Ciliko Creek, agrupados en la **Cooperativa Solary R.L**.; dos empresas de procesamiento de grano de cacao; y un representante de la principal cooperativa que compra el grano de cacao en la región.

La comunidad de Ciliko Creek está ubicada en el corregimiento de Tuwai (Tu Gwai), distrito de Jirondai, Comarca Ngäbe Buglé, próxima a la provincia de Bocas del Toro. La población se dedicaa la AF de cacao de manera orgánica (sin químicos ni aditivos). La información recolectada de las fuentes primarias y secundarias permitió conocer el contexto competitivo, algunas de las características de la actividad de producción, transformación y comercialización de cacao que se lleva a cabo en la comunidad en Ciliko Creek, Changuinola y Almirante.

IV. RESULTADOS

A. Contexto de la cadena de suministros de cacao

Entre los aspectos relevantes sobre el contexto en que se realizan las actividades de la cadena de suministros de cacao en Panamá se tiene:

- **Sostenibilidad social y ambiental:** existe preocupación con la producción agrícola respetuosa con el ambiente; el tema social incluye el precio justo como forma de mantener la equidad (en especial por la participación de productores de pequeña escala y en desventaja económica). Por tanto, se cuenta con la Certificación de comercio justo y de producto orgánico.
- **Ambiente competitivo:** potencial ventaja competitiva debido a que en la región se cultiva Cacao fino y de aroma (la categoría que es valorizada en el mercado internacional [1] con precio diferenciado). Registros recientes realizados por ICCO [1] pronostican demanda internacional creciente, aun con el escenario de pandemia y de conflictos bélicos, por nuevos países consumidores. En Panamá se han creado alianzas público-privadas para fortalecer el sector.
- **Estrategia y legislación:** en ámbito nacional se aprueba el Proyecto de Ley 485 para incentivar la producción, procesamiento y desarrollo del cacao en De igual forma, aborda el tema de tecnologías para el manejo post cosecha que permitan ofertar cacao en sus diversos productos primarios, subproductos y desarrollo de marcas locales. Incentiva la creación de alianzas de cooperación interinstitucional y con el sector privado, para la comercialización del cacao [21]. También está en ejecución el Plan Maestro del Agro que incluye a productores de las provincias de Chiriquí; Bocas del Toro y de la Comarca Ngäbe Buglé para elevar la competitividad y producción de la región. Este plan contempla desarrollar programas transversales de largo plazo en productos con alto potencial exportador entre los que se encuentra el cacao [22].

B. Estructura de la cadena de suministros de cacao en la región de Ciliko Creek

En la Fig. 3 se presenta la estructura de la cadena de suministros de cacao. En las secciones a seguir se describen

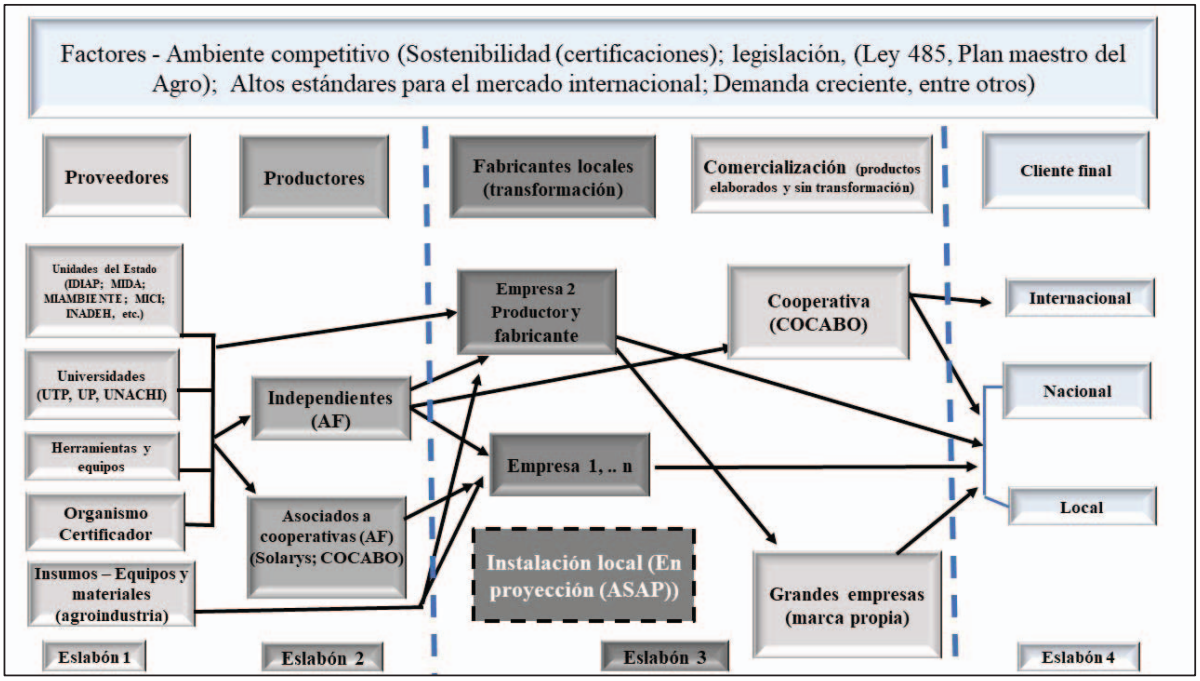


Fig. 3 Esquema de la cadena de suministro de cacao en la región de estudio

las principales características de la cadena y sus actores considerando la situación del mercado mundial y nacional.

La cadena de suministro de cacao está conformada por cuatro eslabones a saber:

Proveedores: están presente diversas instituciones gubernamentales que proporcionan capacitaciones e intervienen con apoyo técnico en la fase de producción primaria del cacao (Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá – IDIAP; Ministerio de Desarrollo Agropecuario – MIDA; Ministerio de Ambiente -MiAmbiente; Ministerio de Comercio e Industrias - MICI; Instituto Nacional de Formación Profesional y Capacitación para el Desarrollo Humano – INADEH).

Se considera que la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) como institución académica y de investigación juega un papel importante en la generación de conocimiento, por ejemplo, sobre buenas prácticas en el desarrollo de la actividad post cosecha, que es compartido en la cadena de suministros de cacao a través de los resultados del proyecto "Sistemas Integrados de Energías Renovables para mejorar la competitividad de Productores de Cacao en la Comarca Ngäbe Buglé".

Pertenecen a este eslabón las empresas que suministran insumos y servicios utilizados en la producción y transformación del cacao. Debido a que la totalidad de fincas producen de manera orgánica, los únicos insumos que reportaron los encuestados se refieren a herramientas utilizadas en las actividades cotidianas en la finca tal como la poda de los árboles que son compradas en las ferreterías cercanas a la comunidad.

Productores: se identifican dos tipos de productores con fincas dedicadas al cultivo familiar (AF) los independientes y los asociados a cooperativas (o sea socios de la cooperativa Solarys R.L. y de la Cooperativa de servicios múltiples Cacao Bocatoreña, R.L. - COCABO, R.L.). Se reconocen al menos tres generaciones de productores, aquellos de mayor trayectoria realizando la actividad con conocimientos empíricos, sus hijos y nietos que son relativamente jóvenes y que han adquirido formación y capacitaciones asociadas a la mejora de la actividad cacaotera. El 100% de los entrevistados señalaron que llevan más de 10 años dedicados a la actividad cacaotera.

Consistente con los estudios consultados [1], [4], [23] se trata de una actividad de pequeña escala, o sea 46% tiene menos de 3 hectáreas de cultivo (ver Fig. 4) y es de tipo familiar (AF) o sea participan todos los miembros de la familia (padre, madre, hijos, nietos y otros familiares). Los productores de cacao entrevistados realizan actividades de cosecha y postcosecha que incluye el fermentado y secado del grano. También cultivan otros productos tales como banano primitivo, ñampí, otoe, entre los principales, que son de autoconsumo.

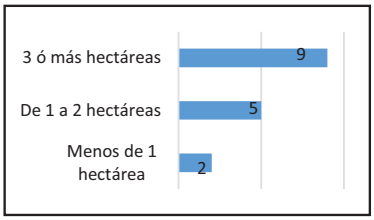


Fig. 4 Datos reportados sobre el área dedicada al cultivo de cacao

Todos los entrevistados (100%) transportan el grano fermentado y seco hasta las instalaciones de la principal

cooperativa de la región que es COCABO R.L y solo uno de los entrevistados dijo vender parte de su producción (fermentado y seco) a empresarios que transforman el grano en producto terminado como barra de chocolate y otros. Para consumo propio y venta local (vecindario) los productores señalaron que producen artesanalmente barras de chocolate.

Debido a los programas de mejora de cultivos realizados por instituciones gubernamentales (IDIAP) se introdujo en la región una especie proveniente de Colombia a la que denominan cacao híbrido. Además, se reportó el cultivo de cacao criollo (fino o de aroma) y 30% de los entrevistados cultivan ambas variedades y 25% de los que participaron en la encuesta dice no conocer la variedad que cultiva y comercializa.

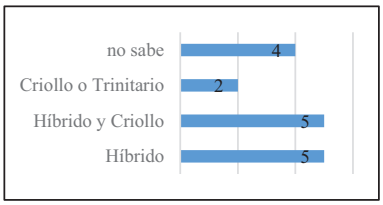


Fig. 5 Variedad de árboles de cacao que se cultiva en las fincas de los entrevistados.

Entre los factores que afectan la producción los entrevistados reportan las plagas (moniliasis) y el clima (lluvias) porque interfiere en el proceso de secado del grano. En [23] se consultó a 250 productores de pequeña escala en Ghana sobre cuál era la principal dificultad que enfrentaban en la actividad que realizan siendo que el 31.5 % indicó que las enfermedades propias del cacao (entre ellas moniliasis), 26.8% la falta de fondos y 6% los incendios.

A la pregunta de ¿cuáles son las principales características que debe tener el cacao para obtener un buen precio? los entrevistados respondieron que debe estar bien fermentado y seco; todos destacaron que el olor y color es importante. Reconocen que el valor que reciben se ve afectado cuando el cacao es cosechado verde o está mezclado, cuando presenta contaminación por plaga, cuando no está bien seco (porque presenta humedad y moho).

La percepción de los entrevistados es que no reciben apoyo de entidades gubernamentales o privadas, sean capacitaciones o asesorías, solo dos (13%) de los entrevistados han participado de capacitación y otros dos (13%) recibieron un secador solar proporcionado por COCABO R.L., que según informan actualmente no están funcionando.

Fabricantes (transformación): en este eslabón se identifican empresas que transforman o elaboran productos a base de cacao entre los que están las barras de chocolate (con distintos % de cacao), *nibs* de cacao, chocolate en polvo, entre otros.

Empresa 1: ubicada en David, Chiriquí, área próxima a la región productora de cacao, compra directamente a los productores de pequeña escala en la Región de Ciliko Creek. El representante de la empresa que fue entrevistado señala que la compra de cacao la realizan a lo largo de todo el año. Han identificado a 10 productores (algunos asociados y otros independientes). En los meses de enero y diciembre reporta que realizan mayor volumen de compra. Por lo general, la empresa llega a comprar 10 toneladas/año y el precio que paga es de B/. 1.30 por libra de cacao seco.

Empresa 2: ubicada en Ojo de Agua, Almirante. Se trata de una emprendedora que además de transformar el grano de cacao en productos que comercializa localmente es propietaria de una finca con árboles de cacao. Sin embargo, debido a que necesita mayor volumen de granos cacao para atender a sus clientes acaba comprando a otros productores de la región. Realiza venta del producto transformado a grandes empresas con marca propia y hace venta directa por medio de redes sociales y localmente en sus instalaciones de procesamiento. Tiene establecidos los controles de calidad del grano de cacao seco que adquiere.

Instalación local, ubicada en la comunidad El Silencio, corregimiento del Empalme, distrito de Changuinola, como futura planta de procesamiento que pertenece a la Asociación Silvo-Agropecuaria (ASAP). Según el entrevistado aún no está en funcionamiento debido a que la entrega de uno de los equipos (desde China) se atrasó por la pandemia provocada por el COVID-19. La proyección que declara el entrevistado es que comprará cacao en grano a productores de la región para elaborar productos a base de cacao y comercializar los productos localmente.

Existe un proyecto en la comunidad indígena desarrollado por la Asociación Ñobä (AÑOBÄ) cuyo significado es cacao en lengua Ngäbe cuyo reto es la producción sostenible de cacao (por medio de sistemas agroforestales) y a su vez involucrar a la juventud que está perdiendo el interés por la agricultura y en especial por la producción de cacao.

Comercialización: se atiende el mercado local, nacional (grandes fábricas, con sus propias marcas) e internacional.

COCABO R.L: es la cooperativa de mayor representación y poder de compra de cacao (fermentado y secado) en la región de estudio [1]. El entrevistado se dedica a temas de capacitación y conoce ampliamente los criterios de compra de la semilla o grano de cacao establecidos por la cooperativa, así como las exigencias del cliente y del mercado internacional que atiende. Reportó lo siguiente:

- El grano de cacao se compra a productores asociados y no asociados a COCABO R.L. a lo largo del todo el año, siendo los meses de septiembre a diciembre cuando se compra el mayor volumen de cacao. La cantidad comprada varía de 7 a 11 contenedores al año, aproximadamente de 175 a 275 toneladas/año.
- Los precios que pagan se fijan dependiendo de la negociación y varía de B/. 1.50 a B/. 1.60 por libra. El precio máximo que se ha pagado a los productores que se acercan a vender su semilla (fermentada y seca) en los últimos años ha sido de B/. 1.75/libra y el precio mínimo de B/. 1.40 por libra. Se percibe que la calidad del cacao ha mejorado en los últimos 5 años debido al conocimiento que ha adquirido el productor sobre las exigencias establecidas por la cooperativa.
- Entre los criterios o razones de rechazo del cacao que es ofertado están: el color (% de violeta), la humedad

que presenta, el porcentaje de fermentación y la cantidad de moho que presente el grano. Esta valoración se hace comparando en una tabla de calidad el resultado de una prueba de corte (se colocan 50 granos de cacao que son cortados para evaluar los requisitos indicados y dependiendo de la ponderación según la tabla se paga y se almacenan selectivamente).

- Confirma que en las fincas productoras de cacao se pueden encontrar las variedades híbrido, forastero y trinitario (o criollo). Además, el cacao fino de aroma (criollo) es el más valorizado por los clientes de COCABO R.L, sin embargo, esta variedad es la que en menor cantidad logran comprar.

Cliente final: local, nacional (empresas 1, 2,…n) e internacional. Los países de destino del cacao seco que vende la cooperativa Cocabo R.L. son Holanda, Costa Rica, España y Canadá. Se vende también a Estados Unidos, Suiza, Alemania.

V. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Los datos analizados a partir de la revisión documental, entrevistas y encuesta permitieron comprender los conflictos, debilidades y potencialidades de la actividad que realizan productores y procesadores (fabricantes) en la cadena de suministros de cacao en la región de estudio. Entre los principales hallazgos en el caso de estudio se mencionan:

- La demanda de cacao ha aumentado sostenidamente [1], [4], [15] a pesar de eventos que han afectado la economía mundial (COVID-19 y conflicto bélico) [7]. El mercado de productos diferenciados a base de cacao valoriza o demanda la categoría cacao fino o de aroma (denominado criollo) que se cultiva y exporta desde Panamá (50%). En la región de estudio, los datos empíricos indican que se cultiva el cacao criollo (fino o de aroma), por tanto, deben colocarse esfuerzos en aumentar el volumen cultivado de esta especie de árbol de cacao para capitalizar la ventaja que ofrece la biodiversidad de la región que es apropiada para la producción de esta especie valorizada en el mercado.
- Existe conocimiento empírico aplicado en las actividades de cosecha y postcosecha. Los productores conocen los factores que afectan su producción, los criterios que requiere el cliente y que por consiguiente pueden afectar sus ingresos. Sin embargo, no existen recursos financieros ni el suficiente conocimiento técnico para lograr superar las dificultades identificadas debido a la carencia de apoyo desde entidades gubernamentales asociadas al fortalecimiento del sector.
- Es indispensable desplegar una tarea de capacitación sobre las características, condiciones y riesgos de la especie de cacao criollo (fino o de aroma). Deberá fluir conocimiento desde las universidades y los centros de investigación para acometer la tarea de capacitar a los productores sobre el manejo óptimo del cultivo.
- La actividad de cultivo de cacao que realizan es importante pero no suficiente para mantener ingresos mínimos y sostenidos que permitan atender las necesidades básicas de las familias dedicadas al cultivo de cacao y otros rubros de autoconsumo.
- La sostenibilidad de la cadena está en riesgo debido a la longevidad de los propietarios o cabeza de familia y al desinterés de los más jóvenes en continuar con la actividad debido a los pocos ingresos que perciben lo que limita la introducción de nuevas prácticas o tecnologías (innovación) para mejorar la producción.
- Aunque existen las cooperativas (Solarys, R.L. y COCABO, R. L.) cada productor, sea independiente o asociado, tiene un mecanismo de subsistencia personal o familiar de generar ingresos. Los datos empíricos indican que cada uno se ocupa de transportar su producto hasta la cooperativa; cultivan y transforman la semilla de cacao (en barras) para venderlos en el vecindario como medio de obtener ingresos propios. Es decir, existe una desorganización de los productores artesanales de cacao en la región lo que implica menor poder de exigencia o negociación ante instituciones del Estado que apoyan al sector. Esta falta de colaboración e integración entre los socios de la cooperativa Solarys R.L. afecta la propia gestión del emprendimiento que realizan.
- Los actores de mayor representatividad (instituciones gubernamentales, universidades y empresarios) necesitan reconocer la importancia de ayudar a los productores de AF para el fortalecimiento de la cadena de suministro de cacao, similar a lo indicado en [14]. Específicamente a través de capacitaciones, seminarios y asistencia técnica para que logren adquirir los conocimientos necesarios para mejorar la calidad y atender los requisitos del mercado sea nacional o internacional sostenidamente.

Se reconoce que por tratarse de un caso de estudio los resultados no pueden generalizarse, sin embrago, los datos encontrados coinciden con resultados de estudios internacionales que indican que a nivel global la actividad de cultivo de cacao es realizada por familias, por tanto, enfrentan consecuencias de baja productividad y calidad por las prácticas tradicionales (empíricas) que imperan. Se recabó evidencia de que la AF no les proporciona los ingresos suficientes para alejarlos de la pobreza y poder disfrutar del potencial que ofrece el aumento de la demanda internacional de cacao fino o de aroma que se cultiva en la región.

Las técnicas de procesamiento artesanal del cacao deben ser investigadas, en términos de inocuidad y efectividad, con el interés de determinar si pueden representar una oferta de interés para un mercado focalizado que esté dispuesto a pagar por productos poco procesados, con identidad de naturalidad y conservacionismo.

Una futura investigación podrá estar enfocada en identificar los patrones de interacción (y comunicación) para de acuerdo con los resultados recomendar mejores prácticas para fortalecer las relaciones entre los diferentes actores en la cadena. En especial para facilitar el flujo de conocimiento, proveniente de instituciones del Estado y de universidades o centros de investigación, que ayude a fortalecer la cadena y en consecuencia generar competitividad y mejores ingresos para los productores de cacao de la región de Ciliko Creek.

AGRADECIMIENTO

Este documento hace parte del proyecto "Sistemas Integrados de Energías Renovables para mejorar la competitividad de Productores de Cacao en la Comarca Ngäbe Buglé" Sistemas – IDDSE19-012" financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de la República de Panamá.

REFERENCES

[1] W. (INIAP) Durango, M. (INIAP) Caicedo, D. (INIAP) Vera, I. (INIAP) Sotomayor, E. (FONTAGRO) Saini, and E. F. (ESPOL) Chávez, "La cadena de valor del cacao en América Latina y el Caribe," 2019. [Online]. Available: https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe_CACAO_linea_base.pdf.

[2] J. Haynes, F. Cubbage, E. Mercer, and E. Sills, "The Search for Value and Meaning in the Cocoa Supply Chain in Costa Rica," Sustainability, vol. 4, no. 7, pp. 1466–1487, 2012, doi: 10.3390/su4071466.

[3] E. Somarriba, "Oferta mundial detecnologías de producciónde cacao prioritarias paraelevar los rendimientos,mejorar la calidaddel cacao y asegurarla sostenibilidad yseguridad alimentaria delas familias cacaoterasde Centroamérica," 2013.

[4] M. S. Beg, S. Ahmad, K. Jan, and K. Bashir, "Status, supply chain and processing of cocoa - A review," Trends Food Sci. Technol., vol. 66, pp. 108–116, 2017, doi: 10.1016/j.tifs.2017.06.007.

[5] ICCO, "May 2022 Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics," 2022. https://www.icco.org/may-2022-quarterly-bulletin-of-cocoa-statistics/ (accessed May 07, 2022).

[6] F. Leon-Villamar, J. Calderon-Salazar, and E. Mayorga-Quinteros, "Estrategias para el cultivo, comercializacion y exportación del cacao fino de aroma en Ecuador," Cienc. Unemi, vol. 9, no. 18, pp. 45–55, 2016, [Online]. Available: file:///C:/Users/51915/Downloads/Dialnet-EstrategiasParaElCultivoComercializacionYExportaci-5774752.pdf.

[7] ICCO, "Fine or Flavour Cocoa," 2022. https://www.icco.org/fine-or-flavor-cocoa/ (accessed Jul. 22, 2022).

[8] A. Villacis, V. Barrera, J. Alwang, C. Caicedo, and J. Quiroz, "Strategies to strengthen Ecuador's high-value cacao value chain," Inter-American Dev. Bank, no. January, p. 30, 2022, [Online]. Available: https://publications.iadb.org/publications/english/document/Strategies-to-Strengthen-Ecuadors-High-Value-Cacao-Value-Chain.pdf.

[9] N. G. Martez and A. Muscat, "O sistema de avaliação de desempenho na cadeia de suprimentos da indústria automobilística brasileira," 2001.

[10] N. Alomoto, C. Acuña, M. Salvador, and J. O. A. J. Ruiz-torres, "La gestión de la cadena de suministro en ecuador: caso de las PyMEs," Rev. Arbitr. Form. Gerenc., vol. 13, no. 2, 2015.

[11] S. S. Sana, G. Herrera-Vidal, and J. Acevedo-Chedid, "Collaborative Model on the Agro-Industrial Supply Chain of Cocoa," Cybern. Syst., vol. 48, no. 4, pp. 325–347, 2017, doi: 10.1080/01969722.2017.1285160.

[12] P. Beske, A. Land, and S. Seuring, "Sustainable supply chain management practices and dynamic capabilities in the food industry: A critical analysis of the literature," Int. J. Prod. Econ., vol. 152, pp. 131–143, 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.12.026.

[13] E. Talamini, E. A. Pedrozo, and A. L. da Silva, "Gestão da cadeia de suprimentos e a segurança do alimento: uma pesquisa exploratória na cadeia exportadora de carne suína," Gestão & Produção, vol. 12, no. 1, pp. 107–120, 2005, doi: 10.1590/s0104-530x2005000100010.

[14] M. Asir, R. Darma, Mahyuddin, and M. Arsyad, "Study on stakeholders position and role in supply chain of cocoa commodities," Int. J. Supply Chain Manag., vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2019.

[15] A. S. Putri, W. Sutopo, S. Prihawantara, and R. C. Matheos, "Value Chain Improvement for Cocoa Industry in Indonesia by Input-Output Analysis," in Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015 Vol II, 2015, pp. 947–952.

[16] N. G. Martez, M. L. Singh, and D. T. Lozano, "Caracterización de la cadena de suministro del cultivo de tilapia: estudio de caso-productores de Chiriquí en Panamá," Rev. Int. ENIAC - Bras. para Todos, vol. 3, no. 2, 2016.

[17] G. H. Vidal, "Diseño de un modelo de planificación colaborativa para la cadena de suministro agroindustrial del cacao, bajo un enfoque de programación binivel (BPL) y valor de shapley (shapley value).," 2013.

[18] I. L. Cañadas Salazar and N. S. Cossio, "Análisis de la cadena de suministro de cacao en el contexto de la Amazonia ecuatoriana," Rev. ECA Sinerg., vol. 10, no. 2, pp. 17–28, 2019, doi: https://doi.org/10.33936/eca_sinergia.v10i2.1483.

[19] R. K. Yin, Case Study Research: Design and Methods. SAGE Publications, 2009.

[20] R. E. Stake and SAGE., The Art of Case Study Research. SAGE Publications, 1995.

[21] EnSegundo, "Aprueban ley que impulsa la producción de cacao en Panamá," EnSegundos -Política, Panamá, 2021.

[22] MIDA, "Plan maestro para el agro de la región occidental 2017-2024," Panamá, 2017. [Online]. Available: https://www.agora.gob.pa/pdf/Resumen Ejecutivo Plan Maestro del Agro para la Región de Occidente Final (optimizado)-yvb.pdf.

[23] D. Mohammed, D. Asamoah, and F. Asiedu-appiah, "Cocoa Value Chain - Implication for the Smallholder Farmer in Ghana," Southwest Decis. Sci. Forty-Third Annu. Meet., pp. 1041–1049, 2012.

Production Management Model Based on Lean Manufacturing and SPL to Increase Productivity in Clothing SMEs

Anderson Liberato-Arenas
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Lima
Lima, Perú
20162190@ulima.edu.pe

Martin Collao-Diaz
Facultad de ingeniería y Arquitectura
Universidad de lima
Lima, Perú
mcollao@ulima.edu.pe

Abstract: Micro and small businesses currently have a low performance in productivity indicators in the clothing industry. For this reason, a management model in production is presented, whose main objective is to increase the productivity of operators in a (SME) textile sector. In response, it is proposed to design a model in the implementation of lean manufacturing tools, TPM and SPL whose approach is based on change management, using a sequence in the methodology to obtain better results. In phase one, a diagnosis of the company will be made using a Street Mapping (VSM) valué. In phase 2, work areas are ordered and redesigned through the adoption of the 5S and SLP and then total productive maintenance (TPM) will be executed with work standardization. Finally, in phase 3, the indicators of the proposed model will be reassessed to validate and corroborate the effectiveness of the implementation of the integrative model.

Keywords— Productivity, 5S, SLP, TPM, SW

I. INTRODUCTION

In recent years, companies in the manufacturing sector have increased their market share. In 2019, the MYPES generated a 4% increase in employment opportunities that would be equivalent to about 47.6% of the economically active population (EAP) and reached about 95% of companies within the country [1]. There is no doubt that these small businesses have the potential but lack certain limitations, such as resources, capacity, financing, and structures that affect their productivity [2]. The textile sector is an important part of this category of manufacturing production, in the last year it had an increase of 5.1% and was the third activity with the highest contribution to GDP [3]. However, most of these micro-enterprises have low productivity rates, and this is mainly since the workers who are hired are not qualified personnel, in fact, 86% of the EAP represents unskilled labor force to perform located and/or refugee activities in informal employment and highlights the productivity gaps with the remains of industrial countries that have incorporated machinery and innovation in this sector [4].

According to the problem identified and making a review in the literature, causes such as high rate of production, quality defects and low performance of personnel, directly affect productivity in a textile company in India. The implementation of Lean 5s, VSM and online balance tools, for example, applied in the sewing area helped a reduction of approximately 34% in the production cycle time and a decrease of 32% in times that did not add value [5]. In other studies, in Bangladesh, low productivity was due to unplanned downtime due to breakdowns or failures, configuration and adjustment. The application of kaizen helped to improve productivity by 23.93% evidencing that the application in one of the pillars of the TPM reveals a benefit in real world production with respect to the textile industry [6].

In this context, the MYPES of the Peruvian textile sector need to improve the performance in their production processes to use their resources efficiently. In this sense, the case study in which the research will be carried out presents a low productivity in the production process, the causes associated with these problems are dead times due to unnecessary journeys, machine shutdowns for lack of an inadequate preventive maintenance plan and reproached for processes that are not being worked efficiently. To solve the root causes, a proposal for improvement in the processes is proposed addressing the tools of systematic layout planning (SPL), 5S, total productive maintenance (TPM) focused on one of the pillars of preventive maintenance and standard work (SW). This combined methodology in the MYPES textile sector will help to increase and have better results in the production process and a reduction of waste and activities that do not add value.

The present research is divided into 4 parts, state of the art, contribution, validation and finally conclusions.

II. STATE OF THE ART

A. Lean manufacturing

Lean manufacturing emerged as a paradigm to make the industry more competitive by eliminating or decreasing waste and activities that do not generate value in production processes through the adoption of different tools with the aim of improving production efficiency. Lean manufacturing focuses on reducing waste and improving productivity through lean tools, flow mapping, 5s, and standardized work. The combination of these tools results in improvements in both the work intensity and the flexibility of the equipment [7]. Applications of these methodologies such as the 5 s where your procedure is based on preliminary planning, results control, Orderly execution, and future improvements have proved to be feasible by greatly increasing the performance of production processes and obtaining competitive advantages to continue in the market [8]. On the other hand, Standardized work (SW) is an essential and necessary tool for solving manufacturing problems, which delivers near-instant results in terms of organizational performance by increasing productivity and decreasing delivery times [9]. The impact of lean operations implementations showed positive results in the performance of companies by reducing the rate of waste and the different

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00022

activities that do not generate value, thus improving financial performance with an increase in net profit [10].

B. Systematic design planning (SLP)

In global competition, it is essential for any company to minimize manufacturing and service costs while maintaining quality in production processes. One of the most recurring problems is about the layout of the facilities, where it is a very important consideration to consider, to reduce the cost of handling materials and, therefore, improve productivity. The optimal design and layout of the facilities has a significant impact on the total cost of production [11]. On the other hand, the demand for technology is increasing more than ever. For this reason, this causes a constant increase in the production rates of current models and even the entry of new models of products. This in turn often leads to changes in the design of manufacturing enterprises. The design of the plant is greatly improved by making appropriate use of resources and providing means for the adoption of lean tools which will not only reduce costs but also improve the quality of the product to the benefit of the organization [12]. An optimal design can increase production levels. This is because the hours worked by operators and for machines are lower, it can also increase the predicted targets per day by shortening and decreasing the transport time, managing to meet existing demands by consumers [13]. The SLP offers a better initial viable solution for the design of the facilities and thereby reduce movements within the plant. One of the main parameters in the work is the relationship between adjacent departments within the organization. Many of the industries do not attach sufficient importance to the relationship between departments and mistakenly assume that it will not cost the organization much [14].

C. TPM

Total productive maintenance is an innovative approach by the "KAIZEN" philosophy where its main objectives are to maximize the overall effectiveness of the equipment, improve the cost of the life cycle, increasing the quality of products and developing the knowledge and skills of staff. The TPM applies numerous maintenance strategies to help improve the quality in the different maintenance activities, which results positively in a reduction of defects and a better-quality rate. That is, maintenance management activities are the combination of all administrative techniques including continuous supervision, where they ensure that the manufacturing system is operating in the required manner [15]. The implementation of this methodology brings with it several advantages such as improved quality due to a stability of the production equipment and a productivity performance eliminated cuts, lost pace, and unscheduled micro stops, a reduction in delivery time due to easier timing [15]. A detailed analysis of machine failures greatly influences the adoption of the TPM is its different phases by the project model: preparatory, introduction, implementation and finally consolidation. This model allows activities to detect root causes such as downtimes due to employee errors where they can become an opportunity to improve with high results at the end of the implementation, which makes this methodology a powerful tool in maintenance management [16].

III. CONTRIBUTION

A. Basic model

For the elaboration of our production management model, we take as a pattern the different proposals in the articles studied on the productivity performance based on the methodologies and tools used in the organizations. Compared to other models applied to larger-scale industries in the manufacturing sector, the model presented does not take into account a managerial area, since most of the Mypes are own businesses by entrepreneurs as presented in this case study. Also, the novelty that contributes this model is the adoption and the sequence used of lean manufacturing tools and SLP to significantly increase productivity performance. The different tools presented in this article will be presented in table 1 below.

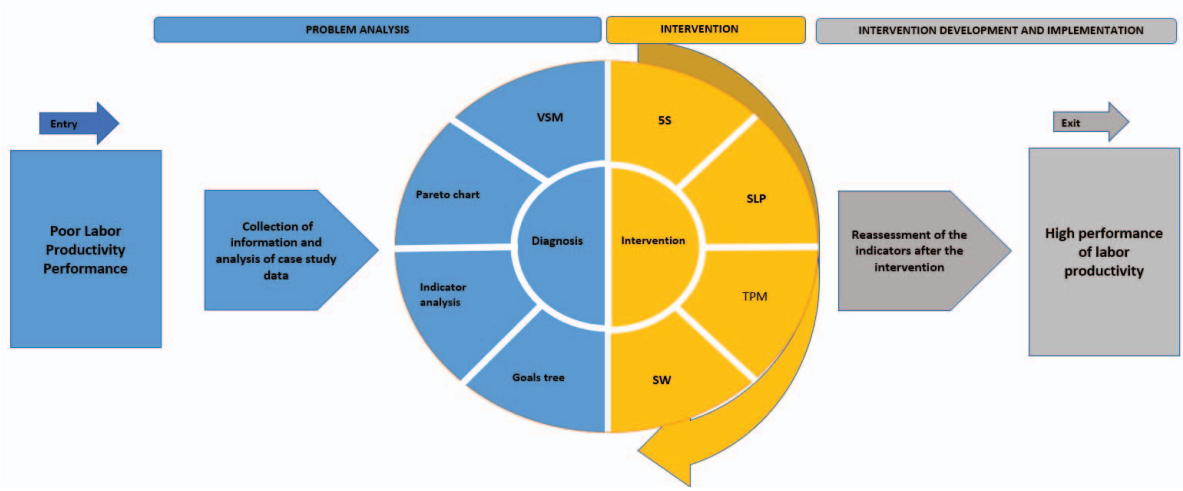
TABLE I. COMPARATIVE MATRIX

	Causes			
Scientific article	**Clutter in the work area**	**Unnecessary travel**	**Inadequate maintenance plan**	**No standard processes**
Jiménez Mariano, romero Luis, Fernández jon, Espinoza maría	5S			
Gaurav goyal, Devendrá S. verma		SPL		
Syed Asad Ali Naqui Muhammad Fahad Muhammad Atir Muhammad Zubair y Muhammad Musharraf Shehzad	5S	SPL		
D.Phanindra Kshatra, Ratnam Prasad Paladagu, Praneeth Inturi, G Sree Vishnu, Vsvsbadrinath	5S		TPM	
Nel.A Marnewick, M. Mogaramendi.H	5S			SW
Propuesta	5S	SPL	TPM	Standard work

B. Proposed model

The proposal for this model is divided into three parts or components in a sequential manner as shown in figure 1 below.

Fig. 1. Proposel Model.



C. Model components

- Problem analysis

Component one will collect as much information as possible to identify the main problems that generate a deficit in the performance of the workers, which is causing a low efficiency in the productivity of the company. This can be done by creating a value flow map that allows us to clearly identify and obtain better results in the production flow. That is, it determines whether each process in the line of operations adds value or not to the customer's perspective. Also, to calculate the main indicators such as productivity, level of service, efficiency, cycle time and distance, we used historical data from the company where it was possible to verify that they are lower than that of the study sector.

- Intervention

The first step of the intervention is to apply the tool of the 5s consisting of an ordered sequence to obtain better results. In addition, a small motivational campaign will be held previously on the tool in use to raise awareness of the future benefits that it will bring if there is responsibility and teamwork by all staff. The sequence of the 5s starts with removing all unnecessary elements that are detected in the work area. This will be done by placing visible labels on each excess material so that they can be quickly identified and removed in a specific temporary area. The second phase is to request and identify only the primary elements in the work area. That is, the items or materials with which they are usually worked. In the third phase is to eliminate all possible sources of dirt to keep the workstation in optimal condition. The fourth phase will seek to indicate the basic tasks of the operators and in the last phase will establish an inspection of compliance with all the steps described above.

Step two in the intervention consists in the application of the SLP methodology where the plant distribution of the company can be significantly improved. This adoption consists of 6 phases, starting by determining the company's production capacity, using monthly data to obtain greater range in terms of total capacity. In the second phase, the flow of materials along the production line will be analyzed, where a graph will be sketched for a better understanding of the flow and to study the interactions between the different areas of operations. In the third phase it will establish the current coordinates of the work areas and their relative positioning between them. In the fourth phase, the space occupied by each work area will be measured and the measure that each department will obtain will be designated. This decision is fundamental to the design problem that will be elaborated later since its cost of established space is essential for possible future expansions. The penultimate phase will reveal the possible designs that will relatively optimize the productivity of the company. Finally, the best design will be chosen for the production plant.

In step 3 of the proposed model intervention, the TPM methodology will be partially implemented, where the pillars of preventive maintenance and the training and training of personnel will be considered to enhance productivity efficiency. This execution will be divided into three stages: introduction, implementation, and consolidation. At the introduction stage it is necessary to make a diagnosis to develop the most appropriate strategy that the company will take. This analysis will consider the company's database as the costs used in the equipment maintenance history and all possible history of breakdowns. Also, the failures of the machines will be considered in a maximum period of three months to have a reference not far away. In the implementation part, the efficiency of the teams will be improved, where it will be quantified through the OEE indicator. Then about preventive maintenance the most important is to carry out a record of the current state of the equipment, draw up a list where you can verify that the machine is slowing down. In addition to making a list of spare parts to be able to ensure that the equipment works properly, since it is vital that a machine does not stop in full operation. Finally, the training of the operators and the constant control where it can be verified that everything goes smoothly in the process of the production lines will bring positive results for the company. In the last step of the intervention, work standardization will be used, where it is a method that is not only used to control and direct processes, it also significantly reduces costs and maximizes the efficiency of production lines. Likewise, in small organizations in the manufacturing industry it is ideal to compensate for the lack of technology.

This methodology consists of 4 phases or stages that will be executed sequentially for optimal results. It begins by analyzing the production process, where the main objective is to obtain current information on operations for a preliminary study. Next, the times and movements in the work areas will be analyzed, where the collaboration of all the personnel working in the plant will be required. The main objective of this task is to eradicate inefficiencies and measure the performance of the operator. Likewise, in the third phase, a template will be provided where precise instructions will be specified on how to work in the production process with respect to each area. To be able to guarantee that each work area works properly without problems. In the last phase of the standardization of work, the respective inspections will be carried out periodically for a better management of all the stages.

D. Indicators of the proposed model

To verify the improvements obtained after the implementation, the following indicators will be reassessed:

- Labor Productivity Index

This indicator measures how productive the staff is in the production plant. The goal is to increase by 12% compared to the initial.

- Efficiency index

This indicator measures the efficiency of how much is expected to be obtained in each time. The goal is to increase by 7% compared to the initial.

- Defective products

It is the percentage of defective products of the total processed. The objective is to decrease by 7% of the current one that it presents.

IV. VALIDATION

This solution proposal for the company dedicated to the textile sector uses different improvement tools with the main objective of increasing the low labor productivity of the operators in the production process. To reach an adequate analysis, I have identified the main causes of this deficit in the organization, a diagnosis was made at the beginning, where the main causes could be found and with it, the necessary techniques were used to reduce or eliminate the problem from its roots.

A. Initial diagnostic

It was possible to show that the low labor productivity of the personnel was directly affecting the objectives set by the company. Of the different areas in the production process, two main ones could be verified. For this reason, greater emphasis will be placed on the cutting and overlocking area to increase its efficiency and reduce the bottlenecks that are causing a slower pace in the production process. It is worth mentioning that the low productivity in the production process generates a current economic impact of 19,600 soles. This impact is a consequence of the false freight incurred by the company for not fulfilling the agreed orders and the penalties by the clients. Likewise, the raw material and overtime that are spent in excess for not reaching the established goal directly affects the profits generated by the company. The main causes that are causing this problem are the downtime that is generated by unnecessary tours due to poor plant layout, non-standard processes and machine stops that occur constantly due to ignorance of the basic facilities and for not presenting a plan. of preventive maintenance periodically, which results in an efficiency of approximately 77.98%.

B. Validation design and comparison of the initial diagnosis

The initial diagnosis was established through value flow mapping, to find the current situation of the production process. The product that was analyzed was the polo shirt since it currently has the highest demand in the company. In the first stage of the implementation of the improvement proposal, a correct distribution of the work areas and design alternatives of the plant were applied to eliminate the unnecessary routes of the operators, such as the flow of materials. In the second stage, the adoption of total productive maintenance to guarantee preventive maintenance and finally the standardization of work to obtain quality products. The proposed objectives are presented below in Table II.

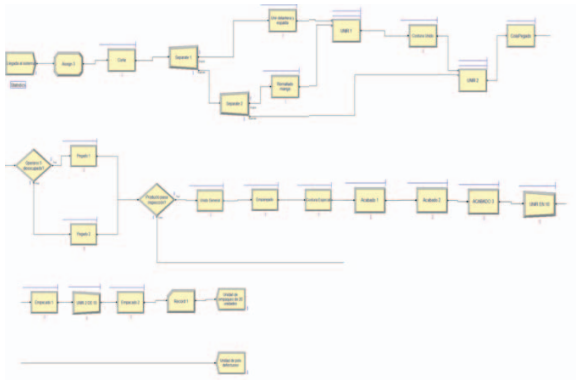
TABLE II. INDICATORS OF CURRENT SITUATION VS OBJETIVES

Indicator	Present	objective
Productivity unid/(H-H)	0.8 unid /(H/H)	1.06 unid/(H/H)
Efficiency (oee) %	77.98%	85%
Defective products	12%	5%

C. Simulation of the improvement proposal

To validate our improvement proposal, it is important to mention that thanks to the Arena program, it was possible to analyze the current behavior of the company and simulate scenarios where comparisons can be made and positive results for the company can be obtained. The proposed improved simulation can be seen in Figure 2 below.

Fig. 2. Graphic representation of the proposed model.



In the main indicator, great improvements could be obtained, increasing the company's labor performance from 0.8 H/H to 1.04 H/H, which represents 90% of the objective set. This is mainly due to the reduction of downtime that hindered the work of the personnel in the different areas of the production process. On the other hand, in machine stops, another of the causes that also diminished and wasted the performance of the workers, especially due to inadequate maintenance that is not carried out periodically, it was possible to achieve an improvement in the efficiency of the work teams. This reached an efficiency of 87% especially in the overlock and cover machines that caused bottlenecks and waste of time in the organization. In the same way, in the

standardization of processes, mapping each step to correctly identify the corresponding tasks in each procedure and not making mistakes, improvements were obtained in 70% of what was planned.

TABLE III. CURRENT INDICATORS OF THE SYSTEM VS. WHAT WAS PROPOSED

Indicator	Present	Improved	Variation
Productive (unid/H-H)	0.8	1.04	+0.24
Efficiency (oee) %	77.98%	87%	9.02%
Defective products	12%	4%	-8%

The improvements obtained from the solution proposal guarantee very significant improvements for the clothing company, obtaining results above what is expected in the indicators of efficiency, defective products, and service level, guaranteeing its adoption by the company.

IV. CONCLUSIONS

It can be concluded with the proposed methodology that the implementation of lean manufacturing tools and the system layout planning manages to increase the labor productivity of the operators who are usually diminished due to infinite causes in the production process. For this reason, an adequate adoption of the entire organization from the cleaning staff, operators and even the managers themselves must be joint for the benefit of all. On the other hand, it was possible to qualitatively demonstrate the effectiveness of the proposal by obtaining a 90% increase in labor productivity for the clothing sector in SMEs. Likewise, the efficiency of the work teams improved by 9.02%, product defects were reduced by 8% and finally the level of service by 4%.

For future improvements in the manufacturing sector, it is recommended to use other very essential tools such as reducing the set-up time, since they are of vital importance for greater results.

REFERENCES

[1] IEES. (2021, March). Textile and clothing industry. SNI. https://sni.org.pe/wp-content/uploads/2021/03/Presentacion-Textil-y-confecciones-IEES.pdf

[2] ministry of production. (2017, March 22) textile and clothing industry. Produce https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/oee-documentos-publicaciones/documentos-de-trabajo/item/725-textil-y-confecciones.

[3] ILO. (2015, April 1). 18. Productivity (Decent Work Resource Platform for Sustainable Development). https://www.ilo.org/global/topics/dw4sd/themes/productivity/lang--en/index.htm

[4] Pinto, G., Silva, FJ, Fernandes, NO, Casais, R., Baptista, A., & Carvalho, C. (2020, September 29). Implement a maintenance strategic plan using TPMmethodology.ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197892032060

[5] Ahmad, N., Hossen, J., & Ali, SM (2017). Improvement of overall equipment efficiency of ring frame through total productive maintenance: a textile case. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94 (1–4), 239–256. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0783-2

[6] Ahmad, R., & Soberi, MSF (2017). Changeover process improvement based on modified SMED method and other process improvement tools application: an improvement project of 5-axis CNC machine operation in advanced composite manufacturing industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94 (1–4), 433–450. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0827-7

[7] Ali Naqvi, SA, Fahad, M., Atir , M., Zubair, M., & Shehzad, M (2016). Productivity improvement of a manufacturing facility using systematic layout planning. Cogent Engineering, 3 (1), 1207296. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1207296

[8] Alkhoraif, A., & McLaughlin, P. (2018). Lean implementation within manufacturing SMEs in Saudi Arabia: Organizational culture aspects. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 30 (3), 232–242. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.002

[9] Alvarado, L., Quispe, G., & Raymundo, C. (2018). Method for Optimizing the Production Process of Domestic Water Tank Manufacturing Companies. International Journal of Engineering Research and Technology, 11, 1735–1757. https://www.researchgate.net/publication/330313232_Method_for_optimizing_the_production_process_of_domestic_water_tank_manufacturing_companies

[10] Behnam, D., Ayough, A., & Mirghaderi, SH (2017). Value stream mapping approach and analytical network process to identify and prioritize production system's Mudas (case study: natural fiber clothing manufacturing company). The Journal of The Textile Institute, 109 (1), 64–72. https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1322737

[11] Calculation and improving the Overall Equipment Effectiveness for Textile Industry Machine. (2020). International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8 (9), 6085–6090. https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/193892020

[12] Correia Pinto, GF, José Gomes Da Silva, F., Octavio Garcia Fernandes, N., Carla Barros Casais, R., Baptista Da Silva, A., & Jorge Vale Carvalh, C. (2020). Implementing a maintenance strategic plan using TPM methodology. International Journal of Industrial Engineering and Management, 11 (3), 192–204. https://doi.org/10.24867/ijiem-2020-3-264

[13] Fen, S., Yanto, H., & Prastyo, D. (2018). Lean manufacturing and overall equipment efficiency (OEE) in paper manufacturing and paper products industry. Advanced manufacturing technology. Published. https://www.researchgate.net/publication/327664585_Lean_manufacturing_and_overall_equipment_efficiency_OEE_in_paper_manufacturing_and_paper_products_industry

[14] Ghalehkhondabi, I., & Suer, G. (2018). Production line performance analysis within a MTS/MTO manufacturing framework: a queuing theory approach. Production, 28. https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180024

[15] Guillen, K., Umasi, K., Quispe, G., & Raymundo, C. (2018). LEAN Model for Optimizing Plastic Bag Production in Small and Medium Sized Companies in the Plastics Sector. International Journal of Engineering Research and Technology, 11, 1713–1734. https://www.researchgate.net/publication/330312610_LEAN_model_for_optimizing_plastic_bag_production_in_small_and_medium_sized_companies_in_the_plastics_sector

[16] Jiménez, Romero, Fernández, del Mar Espinosa, & Domínguez. (2019). Extension of the Lean 5S Methodology to 6S with An Additional Layer to Ensure Occupational Safety and Health Levels. Sustainability, 11 (14), 3827. https://doi.org/10.3390/su11143827

How equipment impacts World Class Manufacturing.

Como los equipos impactan la Manufactura de Clase Mundial.

Jorge Alberto Bonilla Cedeño
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
jbonillacedeno@gmail.com

***Abstract*—The world is becoming more demanding in terms of the way it is produced. Industries want to be more and more efficient, to reduce costs, such as by eliminating waste, which is responsible for expenses that can often be prevented and expenses of all kinds, from discarded material to lost production time. operators or process slowdown. In addition, the industry is looking for other ideals such as reducing environmental impact and controlling production to maximize quality, improve reliability and be able to address failures early, even predictively. To achieve the parameters of World Class Manufacturing (WCM), a significant effort is required on the part of the industries, which will be simplified, or its level of complexity will be increased depending on the equipment that was selected at the time: its cost and capabilities. This paper shows the most important parameters in the selection of equipment and its impact in the short and long term, thus, it is concluded that a bad selection effectively condemns bad production, unnecessarily complicating the producers and managers of the production floor, and how a correct selection allows, in addition to producing more efficiently, to adapt the equipment to the passage of industrial revolutions. Although it is true, that there are many variables, the important thing is to be aware of their impact and existence, allowing a more detailed analysis, and achieving a better decision.**

Keywords— Equipment, Production, Risk Analysis, Reliability, Performance Indicators.

Resumen — **El mundo es cada vez es más exigente en cuanto a la forma de producir. Las industrias desean ser cada vez más eficientes, para así poder reducir los costos, como por ejemplo al eliminar los desperdicios, que son responsables de gastos que muchas veces se pueden prevenir y gastos de todo tipo, desde material descartado, hasta pérdidas de tiempo de los operadores o ralentización del proceso. Además, la industria está en busca de otros ideales como reducir el impacto ambiental y controlar la producción para maximizar la calidad, mejorar la confiabilidad y poder atender los fallos de manera temprana, incluso de forma predictiva. Para poder alcanzar los parámetros de la Manufactura de Clase Mundial (WCM) se requiere un esfuerzo importante por parte de las industrias, que se verá simplificado o se le incrementará su nivel de complejidad dependiendo del equipo que se seleccionó en su momento: su costo y sus capacidades. En este trabajo se muestran los parámetros más importantes en la selección de los equipos y su impacto a corto y largo plazo. Así entonces se concluye que efectivamente una mala selección condena una mala producción, complicado innecesariamente los productores y encargados del piso de producción y cómo una correcta selección permite, además de producir más eficientemente, adaptar los equipos al paso de las revoluciones industriales. Si bien es cierto, las variables son muchas, lo importante es ser consciente de su impacto y existencia permitiendo un análisis más detallado, logrando una mejor decisión.**

Palabras claves — Análisis de Riesgo, Confiabilidad, Equipos, Indicadores de Rendimiento, Producción.

I. Introduction

Un acto que parece cotidiano y sencillo, como lo es el hecho de comprar un equipo de producción, es capaz de contribuir a una producción eficiente y que cumpla los estándares que busca una empresa, cuyo ideal de producción es la Manufactura de Clase Mundial, conocido por sus siglas en inglés como "WCM"; o, en su defecto, una mala selección condenará la producción a ineficiencias, fallos y cuellos de botella permanentemente. Esto sin duda alguna puede que suene lógico, sin embargo, el cuidado y detalle con el que se hace no siempre es el más adecuado. Es común encontrar en las empresas, "parámetros" de selección de equipos que se han utilizado desde hace ya muchos años o que carecen de un criterio técnico. Algunas empresas seleccionan sus equipos basados en una marca reconocida, un modelo de equipo que ya haya sido probado en la empresa anteriormente, equipos de los que se tengan repuestos en el inventario o, en su defecto que los repuestos se puedan conseguir de manera fácil y ojalá económica con tiempos de entrega favorables y hasta el precio del equipo son parámetros ya ampliamente discutidos y que son importantes a considerar pero no tan relevantes en cuanto a las posibilidades de ser eficientes productiva y económicamente hablando a partir de la selección de un equipo.

A esta altura del desarrollo industrial, existen un sinnúmero de otras variables que tomar en cuenta para hacer una correcta selección de un equipo. En un mundo cada vez más conectado, donde la globalización permite acceder a más proveedores, donde las revoluciones industriales son cada vez más frecuentes y donde la calidad, el análisis de datos a gran escala (Big Data), la confiabilidad y riesgo son conceptos que cada vez cobran más relevancia en la producción y es necesario entonces hacerse preguntas adicionales para concretar una correcta escogencia.

Además, hoy día entendemos que otros conceptos, como: la vida útil del equipo, el ciclo de vida económico y el ciclo de vida tecnológico, nos debe hacer cuestionarnos a la hora de tomar una decisión en cuanto a la selección de equipos. Donde inclusive se pueden usar modelos económicos junto con los modelos de mantenimiento para entender cuándo es el momento más adecuado para

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00023

reemplazar un equipo por uno nuevo. Vivimos en un mundo cambiante donde tecnologías como análisis de datos, conectividad, monitoreo en tiempo real de las variables de operación, mantenimiento basado en condición y una creciente intención de automatizar procesos deben causar un análisis profundo sobre cómo se hace la selección de compra de un equipo con vistas al futuro. Para que el día que sea necesario dar el paso tecnológico se pueda hacer de una forma natural y sin recurrir a inversiones altas que ralentizarán el proceso de evolución tecnológica.

Asimismo una correcta escogencia va a garantizar una inversión segura, que satisfaga las necesidades que existan en el piso de producción, las garantías que piden o pedirán los clientes y salir a comprar a un precio justo, lo que en verdad se necesita o necesitará. Esto también evita recurrir a gastos adicionales en equipos sobredimensionados, con capacidades que no van a ser requeridas. El riesgo de adquirir un equipo sin las capacidades necesarias afecta no solo la producción, también puede terminar excluyendo un equipo de las mediciones en indicadores importantes en la industria moderna, como lo pueden ser el OEE (Overall Equipment Effectiveness), Disponibilidad, Confiabilidad, o indicadores de eficiencia energética y los costos por mantenimiento. Y es que lo que no se mide, puede estar empeorando sin que nadie se entere.

Por dar un ejemplo, según [1], el OEE para empresas que cumplen con WCM, superan el 85% y algunas hasta el 99%. Este indicador se calcula multiplicando tres indicadores, Disponibilidad, Producción y Calidad, entendiendo disponibilidad como las horas disponibles, producción como la cantidad de producto o ciclos completados y la calidad de esos productos.

$$OEE = D \times P \times C \tag{1}$$

Donde,

$$D = \frac{horas\ diponible}{horas\ de\ operación\ planificada} \tag{2}$$

$$P = \frac{cantidad\ de\ ciclos\ concluidos}{ciclos\ esperados\ en\ tiempo\ disponible} \tag{3}$$

$$C = \frac{productos\ manufacturados\ aceptados}{total\ de\ productos\ manufacturados} \tag{4}$$

Lo crítico de este indicador es que un bajo OEE, significa producción no completada, ya sea por una baja disponibilidad (muchos paros por mantenimiento), baja producción (ralentización del equipo) o baja calidad de producción. Entonces una empresa con equipos cuyo OEE alcance el 99%, contra una empresa que ronde un 70% tendrá diferencias significativas en sus rendimientos económicos, pero poder medir con exactitud y rápidamente este indicador, requiere capacidades como conteo de ciclos y comunicación con el programa de mantenimiento para determinar los tiempos de reparación y con calidad para saber su tasa de productos aceptados. Hacerlo manual para todos los equipos de una línea de producción, es una tarea imposible o muy costosa.

II. ANÁLISIS DE RIESGO, CONFIABILIDAD Y CALIDAD.

A. Analisis de Riesgo.

El riesgo es inherente a la producción y muchas veces es difícil de medir. En este caso, es importante preguntarse cuál es el riesgo involucrado en el uso del equipo desde al menos tres aristas diferentes. Primero, el riesgo que involucra su operación para los colaboradores de la empresa. Cada máquina (o herramienta), por simple que sea, involucra un riesgo, puntas o bordes afilados, altas temperaturas, altas velocidades de rotación, etc. Estos elementos, que normalmente no se pueden suprimir, es necesario darles una evaluación pertinente para prevenir accidentes, mitigar o evitar accidentes.

Implementar planes de seguridad, protocolos de revisión de seguridad, equipos de protección personal y hasta rediseños de los equipos para mantener seguro al operador del equipo es esencial para reducir el riesgo. Además, cabe recordar que, en algunas ocasiones, estos accidentes pueden ocasionar grandes pérdidas económicas a las empresas en lotes, tiempo, seguros o demandas que pudieron haberse prevenido.

Las otras dos aristas importantes en cuanto al riesgo de un equipo son, el riesgo en impacto a la producción por un fallo y el riesgo de impacto ambiental. Ambas se comentan ampliamente más adelante, pero, en general se puede decir que son los tres principales riesgos que tiene un equipo en su operación.

B. Confiabilidad.

La confiabilidad según [2], se puede definir como la certeza de que un equipo va a realizar el trabajo que se requiere, en el momento que se requiere, dentro de los parámetros de operación requeridos. Es decir, la probabilidad de que el equipo cumpla con su tarea tal cual sea requerida. Definir cuál es la confiabilidad requerida para cada equipo y la confiabilidad de una línea de producción debe ser una de las tareas más importantes previas a realizar la compra de un equipo. Es necesario evaluar la robustez de mi selección basado en qué tan confiable necesito que sea mi dispositivo para así no impactar en el futuro la línea. La confiabilidad se puede calcular de la siguiente manera:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \tag{5}$$

Donde,

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{6}$$

Con β como factor de forma de la distribución, γ como parámetro de ubicación y η es el parámetro de escala. Los parámetros de a función probabilidad de confiabilidad, según [3] se explican de la siguiente manera: el factor de forma β será menor, igual o mayor que cero, dependiendo de si la tasa de fallos disminuye, se mantiene o aumenta con respecto al tiempo. El parámetro de ubicación γ, basado en el momento de mayor fiabilidad, si hubo un fallo previo a la puesta en marcha será menor a cero o mayor a cero si su mayor fiabilidad llega en el futuro. El valor t equivale al tiempo de la función probabilidad y η es el parámetro de escala o vida característica del equipo.

Toda línea es diferente, producen materiales de diferente costo, de diferente confiabilidad a lo largo de la línea y de diferente expectativa por parte del consumidor o cliente final. Esta decisión va a afectar tanto los procesos de validación de los equipos, como su futuro mantenimiento y por ende la cantidad de producto que pueda ser procesado en esa máquina particular. Es decir, si mi producto es muy costoso y mi equipo es crítico en el proceso, se buscará reducir el impacto de la confiabilidad, para eso yo requiero un equipo muy confiable en su funcionamiento o un mantenimiento constante y riguroso. Así la situación, un equipo altamente confiable es menos propenso a presentar fallos y por tanto menos interrupciones en la línea y más productividad, aunque mayor costo. También una alta confiabilidad tiene impacto en su proceso de validación con mayor cantidad de muestras.

Caso contrario un equipo de baja confiabilidad, donde habrá que estar atento a estar revisando o recalibrando para que no se vean impactados los lotes por problemas de calidad. Pero en ciertas industrias donde su producto es de consumo masivo y de muy bajo costo puede ser que no se justifique una alta inversión para alta confiabilidad. O si mi producto se puede reprocesar fácilmente, a bajo costo en caso de que se encuentren fallos u otras situaciones.

La confiabilidad de un equipo también impacta la confiabilidad de mi línea de producción. Es decir, si mi equipo tiene una confiabilidad muy alta, y le siguen dos equipos con confiabilidad muy alta también, la probabilidad de que se consiga un producto que pase las pruebas de calidad requeridas será mayor, caso contrario a si la confiabilidad de los equipos es baja, incluso si solo una máquina tiene baja confiabilidad, esta impacta a toda la línea por lo que debe hacerse un estudio de riesgo. Por su puesto, si mi línea tiene baja confiabilidad y mi proceso admite constantes retrabajos, tampoco será requerido una alta confiabilidad en el equipo que planeo comprar. A menos, que ese proceso sea el más crítico, o el más costoso. Si esta compleja discusión y decisión no llega en el momento oportuno, es seguro que impactará el proceso en el futuro, de ahí su criticidad.

C. Calidad del producto.

No son pocas las industrias que quieren generar clientes a partir de una estrategia de alta calidad en los productos. Es acá donde los equipos con los que manufacturas sus entregas se vuelven críticos. Ya no solo es una cuestión de alta confiabilidad en el dispositivo. Ahora la decisión va más allá de eso y se puede hablar de una alta calidad, que engloba otro tipo de variables y conceptos.

Para comprender mejor la diferencia entre Confiabilidad y Calidad, hay que imaginar un proceso y dos equipos que tienen alta confiabilidad. Es decir, alta probabilidad de cumplir sus roles a la perfección. Sin embargo, la calidad hace la diferencia cuando, mientras uno, te permite escoger las variables, con uno o dos decimales, el otro permite escoger hasta cinco. Por su parte, mientras uno tiene un freno manual de emergencia, el otro tiene varios modos de fallo, que son automáticos y que bloquean el sistema en algunos milisegundos. Mientras uno permite monitorear las variables en una pantalla frente al dispositivo, el otro tiene un sistema de adquisición de datos, que emite alarmas ante cualquier evento sospechoso en su funcionamiento.

La calidad hace referencia a la seguridad detrás del equipo, a la capacidad del equipo de adaptarse a los diferentes requerimientos de la operación y a la facilidad de operación por parte de los operadores. Aunque ambos equipos a nivel de funcionamiento sean igual de confiables, aquello que hay detrás, en la construcción, en los materiales de fabricación, su factor de seguridad de diseño, sus sistemas de seguridad marcan la diferencia, siempre y cuando esta sea requerida y se justifique en el proceso. Igual puede ser que mi proceso sea tan simple y estable que una baja calidad me es indiferente, siempre que tenga una alta confiabilidad.

III. Analisis de las necesidades del Piso de producción

A. Pronóstico de demanda.

Cuando se desea instalar una línea de producción, muchas veces los ingenieros encargados de la compra de equipos tienen su obligación en eso, mientras que otros equipos, como mercadeo y ventas tiene, por su parte, tareas en definir el volumen de producción requerido para satisfacer la demanda. Acá entra entonces ingeniería industrial con conceptos como el “takt time” o “Cycle time” donde se define cuál es la carga que se requiere para cumplir con los pedidos a futuro.

La producción nunca es estable, aunque hoy hay metodologías que buscan una estabilidad en producción, lo cierto es que por variadas razones la producción difícilmente alcance la estabilidad. Desde cortos en la materia prima, hasta un fallo en los equipos, mantenimiento, problemas de calidad, picos de demanda, inflación, avances tecnológicos, competencia y otras variables impiden la completa estabilidad. Si esto se combina con que todo producto tiene un ciclo de vida, con diferentes etapas desde el lanzamiento, crecimiento, máxima demanda y su muerte o relanzamiento complican aún más la estabilidad de producir.

Lo importante acá es, teniendo este concepto claro, poder definir las variables de operatividad que podrían afectar mi equipo y garantizar que este es capaz de cumplir mi máximo para no afectar la producción o, en su defecto, entender cuál es el límite máximo para definirlo con tiempo y así definir cuáles son los límites de ventas o aumentar el inventario para cubrir los picos de ventas.

Lo que no debe suceder es creer que mi demanda será constante, por ejemplo, 8 horas diarias con 200 productos por hora a una capacidad del 80%. Pero esta foto era instantánea para los primeros tres meses, luego iba a llegar a un pico de demanda de tres turnos, trabajando así 20 horas diarias y se requieren 250 productos por hora, excediendo así las capacidades del equipo. Esto anula el plan de mantenimiento que se había establecido en un inicio, cambia la confiabilidad de mi equipo y reduce el ciclo de vida útil significativamente.

Es por eso que las personas encargadas de hacer estas compras deben entender bien cuál es la proyección de uso, tener amplias conversaciones con los equipos encargados del proceso y así inclusive establecer los ciclos de mantenimiento pertinentes para garantizar su vida útil y su confiabilidad.

B. Interfaz Humano – Máquina (HMI)

La simplicidad de uso de los equipos es otro de los parámetros que se debe buscar a la hora de seleccionar un equipo. Se debe entender que muchas veces quienes operan los equipos no será quien lo compra y por eso es importante tener cierto nivel de empatía con el operador. Si bien es cierto, esto puede resolverse con entrenamiento, hay equipos cuya complejidad es tal que deben hacerse entrenamientos completos, donde incluso un técnico especializado de la empresa que vende el equipo deberá hacer la capacitación pertinente, no solo de procesos de mantenimiento, también de su operación básica.

La identificación de los botones, con su respectivo nombre y color, una pantalla de menú simple, donde se pueda fácilmente identificar cuáles son los parámetros de funcionamiento o los errores. Y aspectos tan simples como la disponibilidad de modificar el idioma de la pantalla son acciones simples pero que durante la operación se vuelven críticas.

También, si las empresas están buscando implementar modelos de mantenimiento autónomo con metodologías como el TPM (Mantenimiento Total Productivo), será necesario poder revisar de manera sencilla aquello que está ocurriendo, diagramas que muestren dónde está el error, o cuál es el estado actual del equipo simplifican el proceso de implementación de estos procesos además de hacerlos más sencillos. Lo que sucede es que si hoy, no se presta interés en esto, cuando se desee hacerlo, su complejidad y costo se van a elevar exponencialmente.

Y todavía es común encontrar dispositivos que dan errores que son simplemente imposibles de descifrar para quien no tiene el manual, y esto ocasiona muchas veces que los operadores, en su ansiedad o nerviosismo, por su aparente responsabilidad como operadores principales del equipo, empiezan a tocar botones de más, que pueden eventualmente complicar aún más la situación.

Esos errores genéricos, como una serie numérica complican situaciones donde el operador se ponga frente a la máquina y llame a su centro de control, y simplemente no se puedan entender, ninguno sabe qué le pasa a la máquina. Frases como "solo dice error", "no sé de cuál botón me habla", "acá ningún botón dice eso", que además pierde mucho tiempo y dinero, pudiéndose evitar con una interfaz sencilla, amigable y su correcto entrenamiento.

IV. Análisis de los procesos de mantenimiento

A. Tipo de mantenimiento.

Previo a seleccionar un equipo debe tenerse claro qué tipo de mantenimiento está arraigado en la cultura de la empresa. Si la empresa tiene sistemas de Mantenimiento Basado en Condición o lo que se conoce como Mantenimiento 4.0, es necesario que los equipos vengan con las condiciones requeridas para que se integren en estos programas de mantenimiento: sistemas de Adquisición de Datos y sistemas de conectividad a la nube.

Si por el contrario, la empresa no tiene buenas prácticas de mantenimiento, entonces será necesario comprar equipos altamente confiables y ojalá de alta calidad y que sus labores de mantenimiento sean mínimas. Si se hace Mantenimiento Basado en Confiabilidad, entonces deberá solicitarse al fabricante la confiabilidad de los componentes y su plan de mantenimiento recomendado para poder crear el plan de mantenimiento específico y adecuado a las necesidades.

Asimismo, si la empresa cuenta con equipos de mantenimiento predictivo, entonces entender con la empresa a la que le voy a comprar la máquina, qué parámetros son los que se van a medir para los diferentes estudios de modos de fallo que le voy a realizar, como análisis de vibraciones, ultrasonidos, puntos débiles para aplicar rayos X, etc.

También vale la pena explorar temas como la realidad aumentada o mixta, con planos en 3D que permiten observar cada parte, su ensamblaje y que además va a permitir realizar prácticas de mantenimiento virtuales antes de intervenir el equipo lo que genera alta eficiencia en los procesos de mantenimiento.

Otras metodologías que pueden ser usadas en las empresas son Mantenimiento Hasta el Fallo o Mantenimiento Basado en el Riesgo para lo que será oportuno entender cuál es su tasa de fallo y vida útil, así como el riesgo económico que está asociado a ese equipo en particular.

B. Repuestos.

En cuanto a repuestos, existen muchas variantes que deben de ser consideradas. La más común es si hay repuestos que se manejan por defecto en la planta, ya que se utilizan en otros equipos ya instalados. También vale la pena establecer por cuánto tiempo se garantiza el suministro de los repuestos para ese modelo, ya que algunos equipos, se sabe que van a ser descontinuados pronto, saber que lo que se está adquiriendo no es una tecnología obsoleta o que lo será muy pronto.

A su vez, entender cuál es el "paquete de repuestos" que deben ser adquiridos con el equipo puede ayudar a dar una idea global del costo del mantenimiento.

Algunas otras variables que deben considerarse son con respecto al tiempo de entrega de los repuestos, ya sea por la representación de la marca en el país o los almacenes de distribución más cercanos. El soporte técnico especializado, con disponibilidad para estar pronto en la planta en caso de requerir inspecciones de garantía o el centro de llamadas de servicio al cliente para solucionar temas del equipo de manera inmediata y no menos importante si los repuestos son especiales para este modelo y se hacen contra pedido o si existen inclusive versiones genéricas de estos.

En algunos casos, en conjunto con los planos del equipo que se solicitan, puede ser beneficioso entender los parámetros de diseño, materiales u otros ya que algunos procesos de manufactura pueden verse afectados por la estática generada en los equipos. El conocer los parámetros de fabricación también puede favorecer el rediseño de piezas o la manufactura de algunos repuestos en talleres de mecanizado con tiempos de entrega y precio más favorables en caso de algún fallo de emergencia.

C. Garantías.

La garantía de los equipos es un tema que muchas veces se entiende como norma y no se le da la relevancia adecuada. Es común encontrar equipos que tienen garantías por defecto de fábrica, garantías por un tiempo

determinado o por una cantidad de ciclos. Inclusive hay algunas que vencen con forme la condición que se dé primero. Esto es cuando menos, engañoso y lejos de ser un verdadero beneficio para quien adquiere el bien, se ha convertido en un asunto de trámite que pocas veces cobra la relevancia que debería.

Primero, si la garantía es por un tiempo determinado y parte de ese tiempo se "perdió" en su desalmacenaje de aduanas, instalación, pruebas, validaciones, ¿Cuánto tiempo se probó realmente en producción? Además, es posible que entonces se haya vencido la garantía por tiempo y no por ciclos. Por su parte, si los ciclos son en ambientes controlados de pruebas, con el debido cuidado y por una persona quien no será el operador real, entonces cuán seguros estamos que no fallará en un tiempo de operación real.

En cuanto a las pruebas, existen muchos tipos, que pueden organizarse en dos grandes grupos. Pruebas en el sitio de fabricación y pruebas en el sitio de producción. Las primeras son muy útiles para detectar errores de funcionamiento tempranas, las segundas para determinar su funcionamiento en las condiciones exactas de operación, basados en los ajustes que demanda el cambio de altitud, presión atmosférica, temperatura, contaminación, etc.

Acá lo más relevante es entender cómo aplica la garantía, qué condiciones de aplicación tiene y muchas veces entender cuáles son los cuidados técnicos que deben llevarse a cabo puntualmente para que la garantía siga vigente, en especial en cuanto a los planes de mantenimiento.

Lo mismo también cabe en el mundo de los repuestos, donde no debería darse, pero se da, que repuestos que están en inventario por algún tiempo, pierda su garantía debido a que ha transcurrido mucho tiempo desde que se compró. Cómo se puede explicar que los repuestos, nuevos, que recién se van a instalar, si salen defectuosos, ya no tienen garantía por la fecha de adquisición, la cual se hizo para tener un respaldo en caso de que se diera un fallo inesperado, tal vez con una parte de diseño especial, que dilataría mucho en hacerla hasta cuando falle y por eso se adquiere anticipadamente.

D. Indicadores de Fallos.

Cuando se compra un equipo, es poco común que se soliciten datos de desempeño o indicadores que los fabricantes deben tener sobre sus equipos. Los tres datos más relevantes que deben conocerse son:

1. Tiempo Medio para Fallar (MTTF):

$$MTTF = \frac{horas\ de\ funcionamiento}{número\ total\ de\ fallas} \quad (7)$$

2. Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):

$$MTBF = \frac{hrs\ desde\ la\ puesta\ en\ marcha}{número\ total\ de\ fallas} \quad (8)$$

3. Frecuencia de Fallos (FF):

$$FF = \frac{cantidad\ de\ fallos}{horas\ desde\ su\ puesta\ en\ marcha} \quad (9)$$

Cuando se pueden comparar estos parámetros con otros equipos entonces se pueden tomar decisiones fundamentadas en su desempeño. Muchas empresas cuando hacen pruebas en sus productos son capaces de determinar estos indicadores y son útiles a la hora de planificar producción, se puede predecir cuándo se va a requerir un paro para mantenimiento basado en curvas estadísticas y así, desde antes de comprar un equipo, incluso se puede saber cuándo va a fallar.

E. Complejidad y equipo técnico.

Existe otro parámetro importante y es la complejidad para armar, desarmar y dar mantenimiento. Como se mencionó anteriormente, una de las nuevas ideas en el campo del mantenimiento, es incluir a los operadores de los equipos en la primera línea de batalla contra el mantenimiento. Estos pueden ser complejo, simple, regular.

Pensando en cómo se puede resolver este desfase es sin duda, inculcar más a los operadores a cuidar de los equipos que se usan, reportando anomalías o irregularidades. Para poder alcanzar el mantenimiento autónomo lo más importante es que sea muy sencillo o evidente que algo no anda de la manera esperada.

Un proceso de mantenimiento muy técnico que requiere ayuda de otros técnicos y departamentos para poder evaluar de manera más precisa las gráficas. Si se requiere un técnico muy avanzado en mantenimiento entonces el posible que se deba invertir en capacitaciones.

V. CONECTIVIDAD, ADQUISICÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.

A. Objetivos a corto plazo.

Otro punto a considerar es qué se requiere controlar y analizar del proceso concreto que va a estar realizando el equipo. Esto con el fin de poder colocar los instrumentos de medición necesarios dentro del equipo. Muchas veces los equipos producidos en serie, no cuentan con las capacidades de medición que se requiere, será el encargado del proceso quien defina qué parámetros se desean controlar, aquellos que sean críticos en la operación y la empresa proveedora de la máquina la encargada de diseñar lo necesario para poder medir.

Entonces los requerimientos de termocuplas, barómetros, relojes, caudalímetros, cronómetros o cualquier instrumento que sea necesario, deberá ser instalada en un oportuno momento y en un lugar oportuno para que cumpla su intención de medida.

A su vez, dependiendo de la forma que este vaya a ser controlado, será necesario convertir la señal del instrumento en una señal digital que sea visible, ya sea mediante una pantalla o mediante un sistema de adquisición de datos, que esto de igual manera deberá transmitirlos mediante internet, teniendo que tener un sistema de conectividad adecuado o deberá ser descargados mediante un dispositivo USB o tarjeta de memoria. Pero todo esto deberá definirse oportunamente con el fabricante.

Existen además otras decisiones que tomar, por ejemplo, algunas empresas pueden tener objetivos en cuanto a la marca de los Controladores Lógicos Programables PLC, porque se alinean mejor a su sistema de Mantenimiento Basado en Condición o Sistemas de Control de las variables de producción, porque la empresa

cuenta con conocimiento previo en la marca, porque cuenta con repuestos de esa marca o simplemente por alinear los equipos con un estándar, las razones pueden ser variadas.

B. Objetivos a largo plazo.

De igual manera es adecuado no solamente pensar en el presente, también en el futuro. Es común encontrar equipos que se reutilizan en otros procesos luego de que la tarea para el que fueron adquiridos dejara de existir o requirió un cambio. Si esto llegase a ocurrir, entonces es bueno tener prevista la posibilidad de que otros procesos requieran medir otras variables.

También, en casos donde la industria no esté migrando a campos como la Ciencia de Datos, esto no quiere decir que en algunos años no lo haga. Si hoy, se compra un equipo sin sistemas de datos, se está condenando la compra a un futuro sin esa tecnología. Esta simple decisión que alguna vez pudo no ser importante, hoy determina el futuro de las capacidades que tengan nuestros procesos donde esa máquina es utilizada, y condena además la posibilidad de darle en un futuro, mayor confianza a la producción.

Gracias a los avances tecnológicos, ya hay procesos donde los consumidores solicitan, por asuntos de trazabilidad, los datos del comportamiento del sistema donde estuvo su producto. Un gran ejemplo es "La Cadena de Frío" que monitorean la temperatura a lo largo de todo el proceso para salvaguardar la integridad del producto ya que su calidad se ve afectada si se rompe. Entonces, si quizá hoy el proceso no requiere este monitoreo, pero el día de mañana, algo sucede y no se tiene la capacidad de monitorear o de haber monitoreado variables importantes, se pueden comprometer grandes cantidades de dinero. La importancia del análisis de riesgos y de haber pensado en posibilidades del futuro, teniendo un equipo robusto.

VI. OBJETIVOS AMBIENTALES DE LA EMPRESA

Claro que el objetivo ambiental, aunque muchas veces se olvida, es importante. Cada vez es más común ver como empresas de manufactura buscan certificaciones ambientales, para demostrar que su producción no impacta o impacta muy poco el ambiente, siendo esto un gran valor agregado y prestigio para estas desde el punto de vista de sus clientes, quienes tienen un sentimiento de afinidad, en contar con proveedores alineados a ellos en temas ambientales. Al final es un ganar – ganar desde muchos puntos de vista.

Lo que no siempre es visible es que la compra de equipos, de una línea de producción impacta las intenciones ambientales de una empresa. El uso de combustibles fósiles, aceites de difícil desecho, baja confiabilidad (exceso de materia prima dañada que se bota), baja eficiencia de consumo energético, componentes de materiales no reciclables y hasta la emisión de ruido en contaminación sónica son algunos de los parámetros que impactan al ambiente, sin olvidar el uso de agua en sus sistemas y su contaminación o el aumento de temperatura, que conllevan un tratamiento especial para limpiarla o devolverla a su temperatura ambiente.

La ingeniería cada vez debe de preocuparse más por estos aspectos y de hecho existen áreas de alto impacto ambiental que desde hace ya varios años vienen trabajando y regulando ciertos tipos de equipos y con objetivos trazados a algunos años en el futuro. Un ejemplo muy claro son los sistemas de refrigeración, donde ciertos refrigerantes se han prohibido y algunos otros están en sendas vías de desaparición, siendo relegados por fluidos menos contaminantes.

Entonces siempre se debe cuestionar cuál es la situación actual de mi equipo en cuanto a contaminación. ¿Está mi sistema prohibido o cerca de estarlo? se exhorta a dejar de usar ese tipo de equipos por otros más eficientes, qué pasa con los fluidos que requiero para utilizar el equipo, ¿Estará prohibido en algunos años?

VII. RELACIÓN, PRUEBAS Y CONFIABILIDAD EN LA MARCA.

A. Pruebas y Confiabilidad.

La marca, la confianza que esta impregna solo al mencionar su nombre es un factor importante a la hora de decidir, por muchos aspectos. Desde la confianza detrás de muchos años de investigación y desarrollo, hasta una sensación de fortaleza en el mercado que puede significar su existencia a lo largo de los años y con ello, soporte técnico y repuestos por un buen tiempo.

También la marca puede ser sinónimo de calidad o confiabilidad debido a sus estándares de producción. Las pruebas que se les realizan a sus equipos previo a ser vendidos y que con eso, se evitan costos adicionales de pruebas en sitio de fabricación (FAT) y alta confianza en las pruebas que se realicen en el sitio de instalación (SAT).

B. Acuerdos Corporativos.

Existen a su vez algunos acuerdos entre compañías que establecen mejorar contractuales en cuanto a precio, tiempos de entrega, soporte técnico, compartir planos u otros que suelen ser importantes a nivel legal pero que garantizan a nivel técnico el desempeño del proveedor y la agilidad en cuanto a cumplir con las necesidades que se tengan en tiempos y por montos preferenciales.

VIII. CICLOS DE LOS EQUIPOS

A. Ciclo de Vida útil.

La vida útil de un equipo está delimitada por un momento en el cual su estado es tal, que las reparaciones se van a volver mucho más frecuentes, costosas y que inclusive al hacerle una reparación ya no se puede garantizar la confiabilidad con la que el equipo fue adquirido, porque tiene otros daños internos que no forman parte de su plan de mantenimiento porque hacerlo representa un costo tan elevado entre el repuesto, desarmar, armar, el tiempo detenido y los peligros que conlleva que simplemente no se hace. De hecho, según [4], el principal motivo de fallo en los equipos, con un 50% de los fallos totales, es su envejecimiento y por ende la llegada del final de su vida útil.

Este ciclo de vida, es inherente a cada equipo pero varía según el mantenimiento que se le haga. Esto, porque un fallo, que cause daños en cadena puede terminar con la vida útil de un equipo mucho antes de lo previsto, mientras que un mantenimiento minucioso y un trato adecuado puede incluso alargar la vida útil del equipo.

Este concepto es clave a la hora de poder seleccionar el equipo, claramente a nivel productivo hay otras variables que tomar en cuenta, otros ciclos que analizar y por tanto,

no vale la pena seleccionar un equipo que dura muchos años, si se va a requerir solo por un período corto. O quizá, sea un equipo que se requiere que dure muchos años, por lo que su robustez deberá ser adecuada para soportarlo.

$$Vida = \frac{vida\ recorrida}{vida\ total}, \left[\frac{ciclo, hrs, km, años,}{ciclo, hrs, km, años}\right] \quad (10)$$

B. Ciclo de Vida tecnológica.

Los equipos están evolucionando muy rápidamente en cuanto a tecnología se refiere. Así la vida tecnológica se dice que es el tiempo que un equipo dura en pasar a ser clasificado como obsoleto. Entre más años pasen entre el lanzamiento de un equipo y su adquisición, más pronto será obsoleto. Claro está que el costo de las nuevas tecnologías es mayor y por tanto es necesario entender cuáles son las necesidades.

C. Ciclo de vida económica.

En cuanto a la vida económica toma en consideración varios parámetros. Uno de ellos es el costo de capital inicial, así como el costo de los mantenimientos a lo largo del tiempo. Es acá donde habría que entender su ciclo de vida se acaba, cuando el costo del mantenimiento es mayor, en comparación con el costo de adquirir un equipo nuevo. Es decir, el ciclo de vida económica es diferente a la vida útil y diferente a su relación con la obsolescencia. Sin embargo, entre más similares sean los ciclos entre sí, será más rentable.

Algunos de los modelos más reconocidos para determinar el ciclo de vida económico son el Costo Anual Uniforme Equivalente "CAUE", como lo muestra [5], en su estudio del tema. Por su parte, [6] expone que un modelo como el CAUE, o el Williams Scott es más rentable para las empresas que un análisis de Ciclo de Vida. También [7] segunda esa teoría al determinar que no existe una razón válida para postponer una inversión con una tasa de retorno positiva, como lo puede ser el caso de reemplazar un equipo por uno más moderno, debido al alto costo de mantenimiento. En su estudio, [8] inclusive aporta que la inflación, no tiene un impacto de retraso en el ciclo de vida económica.

IX. En Búsqueda del Worl Class Manufacturing.

Alcanzar una manufactura estilo "World Class Manufacturing" es complejo, este tipo de manufactura busca alcanzar objetivos realmente ambiciosos a nivel de producción, en cuanto a los indicadores de rendimiento. Se requiere tener equipos que se detengan poco, alta confiabilidad, una mantenibilidad de los equipos baja, alta calidad de producción, alto OEE, etc. En realidad, los valores esperados en el WCM, en algunos casos puede superar el 95%, donde algunas industrias superan hasta el 99%. Para poder alcanzar esto es imposible hacerlo sin una ayuda por parte en los equipos por lo que, alcanzarlo, en realidad, se volverá más o menos complejo, desde que se adquirieron los equipos.

Entre algunas metas que pide el WCM, según recolecta [9], el tiempo planificado de trabajo (disponibilidad) de un 90%, el rendimiento de producción debe ser de más de un 95% y la calidad de producción debe superar el 90% que son los valores que se requieren para calcular el OEE, los nombres de las fórmulas 2, 3 y 4 respectivamente.

A nivel práctico, los beneficios de implementar el WCM en una empresa son variados, desde mayor control hasta mayor eficiencia. La manufactura japonesa, quienes tienen múltiples fábricas produciendo bajo esta metodología así lo han demostrado a lo largo de los años. Así mismo, económicamente las empresas también se ven beneficiadas, reduciendo gastos o aumentando el rendimiento. En cuanto a lo que son equipos y mantenimiento es posible aumentar el margen de ganancias en áreas tan variadas como la disponibilidad del equipo, incremento en la calidad de producción, aumento del mantenimiento planificado, reducción de inventario de repuestos, aumento del tiempo con "herramienta en mano" a la hora de hacer los mantenimientos, reducción de las pérdidas de tiempo por paro en la línea, tiempo en desplazamientos o en la búsqueda de herramientas o repuestos.

El beneficio económico tangible dependerá directamente de cada empresa: su rendimiento actual, el costo de su producción, así como sus márgenes de ganancia y capacidad de crecimiento en su sector. En su contraparte, el punto de mayor complejidad está en la necesidad de poder medir los diferentes indicadores y en la necesidad, por ende, de tener sistemas y equipos capaces de hacer esto.

X. Conclusiones

La forma en la que se decide qué equipo comprar es sin duda una de las más importantes decisiones en aras de tener un rendimiento óptimo, que va a afectar la producción y objetivos a futuro que se plantee la organización. Además de afectar la producción, también afecta los costos en los que se incurre, el impacto ambiental y el tiempo en el que el equipo va a estar operando.

Se concluye que una mala selección puede hacer que sea técnicamente imposible alcanzar los indicadores para una manufactura de clase mundial. Lo que significa ser ineficiente y perder dinero.

También se concluye que los parámetros de diseño con los que se conciben los equipos del proyecto condenan las capacidades de la línea de producción. Una mala selección significará entonces limitar los datos, la interacción máquina – operador y el control que hay en la línea. En el lado opuesto, se puede tener un control excesivo y costoso que al final puede no tener un impacto adecuado. El análisis del riesgo se vuelve entonces crucial para determinar los alcances.

Finalmente, la industria 4.0 y en corto, la 5.0 será mucho más sencillo implementarla si se alinean los criterios de la compra de equipos de manera general a lo largo de toda la organización.

XI. References

[1] Infraspeak, "Blog Infraspeak," [Online]. Available: https://blog.infraspeak.com/es/indicadores-de-mantenimiento/#:~:text=Los%20indicadores%20

de%20rendimiento%20de,la%20evoluci%C3%B3n%20de%20la%20producci%C3%B3n.. [Accessed 22 mayo 2022].

[2] A. Jardine and J. Buzacott, "Equipment reliability and maintenance," *Journal of Operational Research,* vol. 19(3), pp. 285-296, 1985.

[3] J. M. T. d. Pino, "NTP 331. Fiabilidad: la distribución de Weibull," Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Madrid, 1994.

[4] A. Pelliccione, 2016 Maintenance Study: Seven Key findings, Charlotte, Carolina del Norte: Plant Engineering Magazines and Newletters, 2016.

[5] A. Jardine and A. Tsang, Maintenance, Replacement, and Reliability, 1st Edition ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.

[6] A. Endharta and W. yun, "A comparison Study of Replacement Policies for a Cumulative Damage Model," *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering,* vol. 21, no. 4, p. 145, 2014.

[7] A. Pfingsten and M. Ricke, "The Economic Life of Industrial Equipment Reconsidered," *Department of Banking,* pp. 1-16, marzo 2002.

[8] M. Brenner and I. Venezia, "The Effects of inflation and Taxes on Growth Investments and Replacement Policies," *The Journal of Finance,* vol. 38, no. 5, pp. 1519-1528, 1983.

[9] S. Mueller, "Reliable Plant," [Online]. Available: https://www.reliableplant.com/Read/29941/world-class-maintenance. [Accessed 22 mayo 2022].

Design for the manufacture of a product: Modular device for cleaning glass shutters

Diseño para la manufactura de un producto: dispositivo modular para limpiar persianas de vidrio

1st Sergio Gonzalez-Serrud
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

***Abstract*— Currently the market is globalized, competition between industries is increasing, companies strive to remain competitive, introducing innovative products that are easy to manufacture, assemble and that their cost in materials and manufacturing is minimal. This research shows how to design and develop a product from the point of view of manufacturing and mechanics; at the same time, a case study for the creation of a prototype is explained. This study shows the steps of how a product with a high degree of innovation was devised, which has a patent application. The objective of this article is to present in a clear way the design, development (manufacturing) of a modular device for cleaning glass blinds and at the same time it helps as a guide for the creation of a product. The results of this research show that by following the design phases it is possible to create an apparatus that meets customer requirements, is easy to manufacture, assemble, causing the reduction of parts and cost of materials to be used. The use of this article can serve as a reference and guide for the definition of products in other cases.**

Keywords*— Manufacturing design, product development, mechanical design, modular device.

***Resumen* — Actualmente el mercado esta globalizado, la competencia entre industrias aumenta, las empresas se esfuerzan por seguir siendo competitivas, introduciendo productos innovadores que sean fácil de fabricar, ensamblar y que su costo en materiales y manufactura sea mínimo. En esta investigación se enseña como diseñar y desarrollar un producto desde el punto de vista de la manufactura y la mecánica; a su vez se explica un caso de estudio para la creación de un prototipo. En este estudio se muestran los pasos de cómo se ideó un producto con alto grado de innovación el cual cuenta con una solicitud de patente. El objetivo de este artículo es presentar de forma clara el diseño, desarrollo (manufactura) de un aparato modular para la limpieza de persianas de vidrio y que paralelamente ayuda como guía para la creación de un producto. Los resultados de esta investigación muestran que siguiendo las fases de diseño es posible crear un aparato que cumpla con los requisitos de los clientes, sea fácil de fabricar, ensamblar, causando la reducción de piezas y el costo de los materiales a utilizar. El uso de este artículo puede servir de referencia y guía para la definición de productos en otros casos.**

Palabras claves — Diseño de manufactura, desarrollo de producto, diseño mecánico, aparato modular.

I. INTRODUCCIÓN

El éxito económico de casi todos los productos depende de que tan bien se incluyeron los requisitos de los clientes en el diseño del producto. Alcanzar esta meta no es solo un problema de mercadotecnia, diseño o manufactura; es un problema que compete a todas las áreas de trabajo [1].

Un producto es algo desarrollado por una empresa con la intención de venderlo a personas (clientes).

El desarrollo de producto son las actividades y fases que un grupo de diseñadores inicia con la percepción de una oportunidad de mercado y termina en la construcción, producción en masa, venta y entrega de un producto [2].

Un producto exitoso desde la perspectiva de los inversionistas de una empresa con fines de lucro es una tecnología que pueda producirse con facilidad y se venda con rentabilidad [3]. Las características que se utilizan para evaluar el buen desarrollo de un producto son la calidad, costo del producto, tiempo, costo y capacidad de desarrollo. Un elevado rendimiento en estas cinco características debe llevar al éxito del producto, aunque hay otros criterios de rendimiento que también son importantes. Otras características que se utilizan para evaluar el desarrollo del producto surgen debido a intereses de la empresa, miembros del equipo de diseño y de los propios clientes.[4]

El desarrollo de tecnologías es una actividad multidisciplinaria que necesita ayuda de casi toda una empresa; tres funciones son las más esenciales en el desarrollo de un producto: la mercadotecnia [5], diseño y manufactura. La mercadotecnia que funciona como intermediaria entre los clientes y la empresa [6], [7].Identifica las oportunidades de desarrollo de productos, las necesidades de los usuarios, coloca los precios objetivamente y también se encarga de supervisar ciertas promociones a los productos. Las funciones que desempeña el diseño actualmente son: crear los modelados en 2D, 3D en softwares especializados, el diseño mecánico [1], [8], eléctrico y ergonómico [9]. Las funciones principales de la manufactura son operar y coordinar el sistema de producción de la tecnología, compra, e instalación de materiales necesarios para la construcción del producto [10], [11].

Las personas que están integradas al grupo de desarrollo del producto a menudo reciben capacitaciones específicas en investigación de mercado [12], finanzas [13], [14], diseño mecánico [15], [16], ingeniería eléctrica [17], ciencias de los materiales [18] y operaciones de manufactura [19], [20].

El objetivo de este artículo es presentar de forma clara el diseño, desarrollo (manufactura) de un aparato mecánico para

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00024

la limpieza de persianas de vidrio y que paralelamente ayude como guía para la creación de un producto.

II. Diseño de manufactura

El diseño de manufactura (DFM en sus siglas en inglés) es un proceso de diseño que se realiza pensando en la fabricación industrial del producto que se desea vender. Su objetivo es reducir costos tanto en materiales como en el mismo proceso de fabricación [21].

El conflicto más importante y común al momento de diseñar los productos actuales es entre el costo por cumplir los requisitos de los clientes, lo que el cliente potencial está dispuesto a pagar, y el costo de los productos de la competencia [21], [22]. Por lo cual diseñadores utilizan el diseño de manufactura (DFM) para la creación de un producto que tenga una alta eficiencia, un precio competitivo y un costo mínimo [22].

Los diseñadores de producto buscan inicialmente responder las preguntas fundamentales del diseño mecánico y de manufactura. ¿Cuál material utilizar? ¿Qué forma va a tener? ¿Cómo se va a fabricar el aparato? ¿Qué máquina es la más idónea para fabricarlo? ¿Qué tanto se puede reducir el número de componentes que contenga el producto?

La reducción de componentes o piezas mejora la capacidad de fabricación y la facilidad de montaje lo que reduce el tiempo y costo general del producto [23], [24].

III. Antecedentes del caso de estudio

Las personas que poseen ventanas de persianas de vidrio tienen el problema que no pueden limpiar de una manera rápida y eficiente las ventanas. Según encuestas realizadas el promedio de ventanas que tiene una persona en total es de 25 ventanas por casas, dando como resultado en promedio la limpieza de 250 vidrios por casa.

En Panamá hay 900 413 viviendas ocupadas (con un promedio de 3.8 personas por vivienda) según el censo del 2010 [25]. Si suponemos que el 30% de las viviendas panameñas tienen persianas de vidrio se obtiene 270 124 viviendas. Este resultado se multiplica por el promedio de personas por vivienda, resultando que la población que se verá beneficiada con este producto es alrededor de 1 026 471 personas.

El proyecto consiste en la creación de un dispositivo que sea capaz de limpiar los vidrios de las ventanas de persiana de forma íntegra y sencilla.

Fig. 1. Ventana de persianas de vidrio.

IV. Metodología

Las fases de diseño son complejas y requiere de múltiples iteraciones para asegurar que se alcanza la meta propuesta para cada etapa. Es un proceso de importancia, si bien, su cumplimiento de por sí, no garantiza que el resultado sea exitoso para la empresa, en el caso de no seguirlo, se puede garantizar que difícilmente el resultado sea el buscado por las personas implicadas [26]. De acuerdo con Budynas y Keith Nisbett, en su libro Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley [27], McGraw Hill, el proceso de diseño se compone de 6 fases, las cuales algunas fases se pueden dividir en dos partes o más, para lograr un mejor estudio de cada fase, esto depende del líder del equipo.

Las fases de diseño no es un proceso lineal [28], [29], donde se inicia con la etapa 1 y se finaliza en la etapa 6 sin ningún tipo de retroceso. Los estudios sugieren que el proceso debe ser iterativo, por ejemplo, donde se avancen dos fases y luego se deba retroceder una, esto es causado por la naturaleza del diseño.

Para la conceptualización y construcción de un producto, se tienen que tomar en cuenta diferentes etapas que incluye, el proceso de conceptualización y diseño, dentro del que se incluye el reconocimiento de la necesidad, la definición del problema, el planteamiento de problema síntesis, análisis y optimización. Luego se cuenta con la búsqueda de propuestas similares en el mercado, que permita identificar que el producto diseñado no es una copia de otro autor. Posteriormente se cuenta con la fase de prueba o evaluación, en donde se realiza la construcción de un prototipo para validar el mismo. Como último paso el prototipo es presentado a la comunidad [27].

A continuación, se presenta las fases de diseño empleada.

A. Identificación del problema. Se realizan encuestas, entrevistas al personal del área donde se quiere crear un producto. De esta manera se reconoce e identifica los problemas que posee esa área específica.

Se identifica que las personas que realizan la limpieza de las persianas de vidrio lo hacen de una manera precaria y arcaica.

B. Definición el problema. Se incluye todas las especificaciones del objeto a diseñarse. Las especificaciones son las cantidades de entrada y salida, las características y

dimensiones del espacio que el objeto debe ocupar y todas las limitaciones sobre estas cantidades.
El problema erradica en la cantidad de persianas, ya que en una sola ventana hay 12 vidrios, los cuales se les tiene que hacer mantenimiento. El mantenimiento de estas persianas significa un arduo trabajo que da como resultado un mayor esfuerzo y cansancio por parte del usuario.
Por otro lado, la suciedad en los vidrios puede causar una mala impresión, además de la contaminación dentro del hogar, ya que habría polvo en el aire y en el piso.

C. Planteamiento del problema. Permite indagar sobre los síntomas, las causas, consecuencias y posibles soluciones al problema encontrado.
Síntomas: Contaminación del ambiente, deterioro de las ventanas.
Causas: Difícil mantenimiento de las ventanas; no hay realmente un producto creado específicamente para las ventanas tipo persianas.
Consecuencias: Acumulación de polvo dentro del hogar; quebrantos de salud de personas alérgicas al polvo; mal aspecto de la casa.
Pronóstico o solución del problema Dispositivo capaz de eliminar las partículas de suciedad de las ventanas.

*D. Síntesis. Se r*ealizan esquemas o diagramas de las palabras o frases más importantes de la identificación, definición y planteamiento del problema.

E. Búsqueda del Estado del arte previo. Se comparan los productos existentes que están intentando solucionar la necesidad a resolver.
Patente US4718141A [30]: Aparato que tiene utilidad en la limpieza de persianas venecianas. La herramienta incorpora una pluralidad de protuberancias alargadas que contienen unas esponjas que limpian los vidrios.
Patente US2271694A [31]: El objetivo de esta invención es proporcionar un plumero adaptado para su uso con una aspiradora o un dispositivo de limpieza similar.
Patente US2231802A [32]: Aparato de limpieza de ventanas el cual tiene un soporte estructural que contiene múltiples rodillos, dichos rodillos poseen a su vez esponjas o cerdas de hilos para limpiar simultáneamente los vidrios de la cara interior y exterior de una ventana.

F. Análisis y optimización. Se identificaron los usuarios potenciales del producto y los requisitos principales que debe tener el mismo; se dispuso a crear la casa de la calidad [33].

La Casa de la Calidad es un proceso conocido para el desarrollo de productos que está basado en los requisitos de los clientes para el desarrollo de productos y está anclado en las capacidades y recursos de la organización que busca satisfacer esos deseos [34].

G. Generación y selección de conceptos. A partir de la información recabada en la Casa de la Calidad y de las entrevistas; se desarrollan dibujos de posibles dispositivos [35], [36], como alternativas de solución al problema encontrado, ya sea a mano alzada o en un programa computacional destinado a dibujo.
Se recomienda dibujar 3 o más conceptos, para este proyecto se realizó 10 conceptos bosquejados.

Para finalizar esta fase se realiza una matriz de decisión, se escoge el bosquejo que se apega más a los requisitos ingenieriles y de los usuarios potenciales.

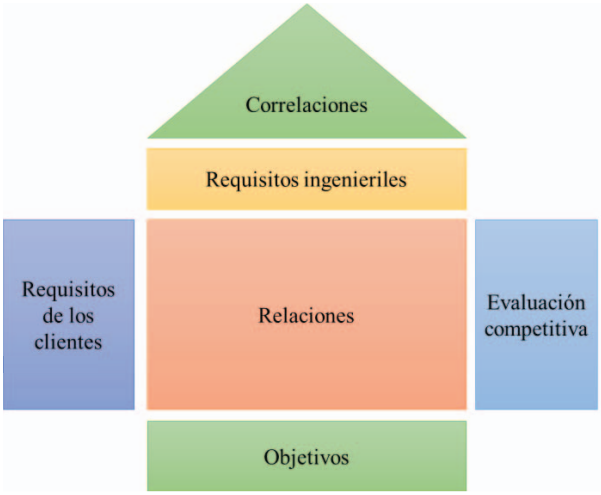


Fig. 2. Estructura de la casa de calidad.

H. Evaluación. Se construye el diseño conceptual ganador, cuya elección fue en la etapa anterior. Luego se realizan pruebas al prototipo obtenido, con el fin de descubrir si el prototipo diseñado satisface las necesidades de los clientes.
En el caso del aparato mecánico de esta investigación se realiza pruebas de limpieza a los cristales de unas ventanas y se observa el funcionamiento del dispositivo y que tan bien limpia (esta prueba fue visual).

I. Presentación. En esta fase se realiza la exposición de resultados, ya sea a través de documentos científicos o eventos en donde participen los potenciales usuarios de la tecnología propuesta.

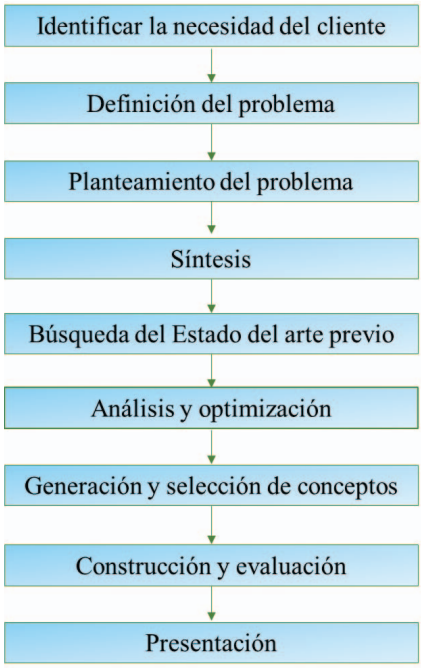


Fig. 3. Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples iteraciones.

V. Resultados

A. Proceso de manufactura aditiva, selección del filamento para la impresión

El filamento escogido fue el PLA (ácido poliláctico) debido que es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar [37]. A diferencia de otros materiales de la industria hechos principalmente a base de petróleo. Debido a sus orígenes más ecológicos este material ha comenzado a popularizarse dentro de la industria, y se ha comenzado a verlo en aplicaciones médicas y en productos alimentarios.

Además, para el aparato presentado no se presentan grandes esfuerzos mecánicos, lo que hace que el filamento PLA sea aceptado para confeccionar las piezas del dispositivo [38].

B. Selección de la impresora 3D

Snapmaker Impresora 3D modelo 2.0 F350. Se escogió esta impresora principalmente, porqué tiene principalmente la capacidad dimensional para construir las piezas, además está específicamente diseñada para usarla con filamentos PLA

El F350 de gran tamaño ofrece un área de trabajo de 13.598 x 14.780 x 13.992 pulgadas, capaz de imprimir prototipos a gran escala de una sola pieza. Sin necesidad de dividir tu archivo en otros más pequeños, acorta el tiempo que lleva de una idea a la realidad [39].

TABLA I
Especificaciones de la impresora 3D, Snapmaker modelo 2.0 F350.

Material	Aleación de aluminio, PLA
Peso	1 kilogramo
Sistema operativo	Windowns, Linux
Material compatible	Ácido poliláctico

C. Imágenes renderizadas y dibujos isométricos

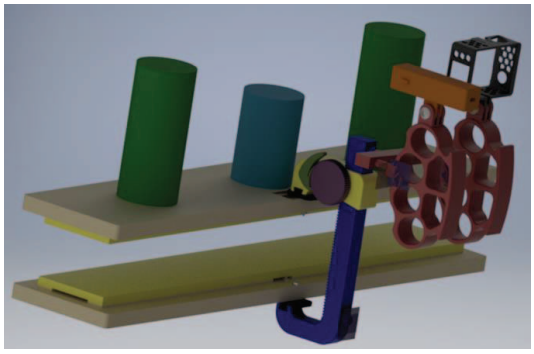


Fig. 4. Imagen renderizada, vista isométrica trasera.

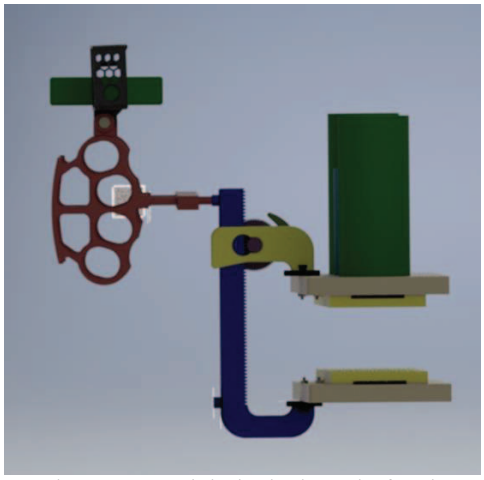


Fig. 5. Imagen renderizada, vista isométrica frontal.

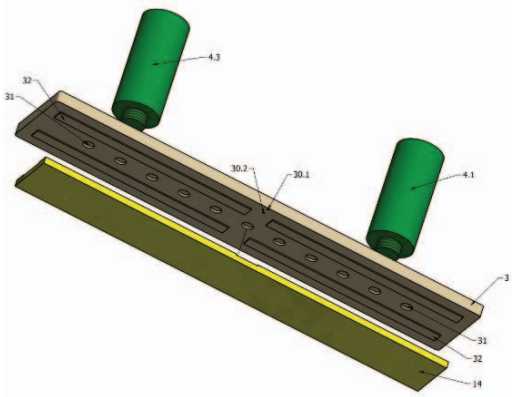


Fig. 6. Dibujo isométrico donde se observan las dos planchas que permiten limpiar los vidrios.

D. Funcionamiento.

El concepto cuenta con una prensa C (6, 5) en la cual estarán la plancha inferior (1) y la plancha superior (3). Las cuales conjuntamente con las esponjas (2, 14) son las encargadas de limpiar las persianas. Las botellas (4.1, 4.2,

4.3) contienen agua y jabón combinados que van directo a (3) y de la plancha (3) el agua moja a la esponja (14). Los manillares (10.1, 10.2) son el medio por el cual se debe agarrar el dispositivo al momento de limpiar. (12) representa una linterna para poder limpiar en áreas con poca iluminación y (11) representa una cámara la cual podrá grabar de manera online u offline el trabajo que está realizando el usuario. (11) se colocó con el fin de que el jefe o gerente pudiera de manera no presencial observar si su empleado está realizando el trabajo correspondiente. Ver figura 9.

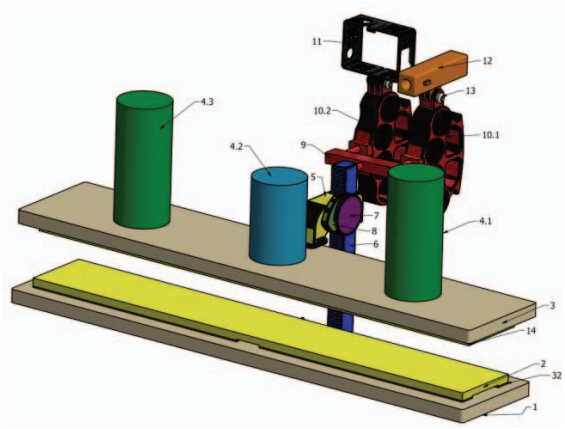


Fig. 7. Los números de esta figura señalan las partes principales del dispositivo.

E. Gastos individuales de las piezas a ensamblar.

Para conocer el costo individual de las piezas se utilizó la página web "i.materialise" [40], la misma realizó el cálculo del costo de las piezas a imprimir en 3D.

TABLA II
GASTOS INDIVIDUALES.

Nombre	# en la fig. 9	Unidad	Costo ($)
Botella	4.1	2	5.85
Botella	4.2	1	2.25
Plancha superior	3	1	10.35
Pancha inferior	1	1	12.25
Almohadilla	2	2	5.00
Velcro	32	1	1.75
Mordaza fija	6	1	17.00
Mordaza móvil	5	1	8.50
Gatillo	8	1	2.5
Piñón	7	1	6.20
Conexión	9	1	6.60
Knuckles	10.1	2	19.00
Carcasa de la linterna	12	1	5.25
Carcasa de la cámara	11	1	7.60
Perno	13	2	2.00
Tuerca	-	2	0.75
Total	-	21	112.85

F. Análisis económico, gastos generales.

TABLA III
GASTOS GENERALES.

	Unidad	Costo ($)
Elaboración de encuestas	2	20.00
Encuestador	2	10.00
Costo total de las piezas	1	112.85
Diseñador	2	50.00
Constructor del prototipo	1	20.28
Impresora 3D	1	1199.00
Total invertido		1412.13

G. Análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas).

Fortalezas.

-Evita la fatiga física del usuario.

-Especialmente diseñado para persianas de vidrio.

-Aparato modular, lo cual permite reemplazar cada una de sus piezas con facilidad.

Oportunidades.

-En Panamá, hay población con un estatus económico medio-bajo [41], por lo cual deben de gastar de su tiempo para limpiar sus hogares. Por lo tanto, un producto que le permita al usuario ser más eficiente en la limpieza es atractivo.

Debilidades.

-Partes como la esponja se verá desgastada por la fricción con el vidrio, por lo cual se tiene que cambiar cada período de tiempo.

-Además de comprar el aparato se tiene que comprar el detergente líquido.

Amenazas.

-Implementación de otros tipos de ventanas en la cual no se pueda utilizas el aparato diseñado.

-Introducción de productos similares al mercado.

VI. DISCUSIÓN

A. Proceso creativo

Para inspirar o mejorar la solución a un problema se han desarrollado diversas técnicas [42], [43]. Robert L. Norton en el libro Diseño de Máquinas recomienda dos procesos creativos [44]. La primera, generación de idea [45], [46]. La cataloga como un proceso creativo difícil, incluso para personas con nivel de pericia alta en diseño. La técnica de generación de ideas utilizada es no desechar, ni juzgar la calidad de las ideas y utilizar juicio diferido, es decir que su criticabilidad debe ser suspendida temporalmente. El objetivo de esta fase es generar la mayor cantidad de ideas y posteriores diseños potenciales. El segundo proceso creativo que recomienda es la lluvia de ideas [47], la cual es una técnica que expertos afirman es exitosa en la generación de soluciones. El único inconveniente es que para realizarla adecuadamente debe haber un grupo de seis a quince personas, si tu grupo es de dos o tres personas, quizás está técnica no sea la más efectiva. Las reglas de este proceso creativo indican que nadie critique las ideas o diseños de otra persona, sin importar que tan insignificante sea. Una persona voluntaria escribe en un tablero, cuaderno o computadora las ideas y sugerencias de sus compañeros, así hasta generar la cantidad de ideas deseadas. El análisis de la calidad de las ideas se realiza más adelante.

B. Ingeniería de diseño

El ingeniero o diseñador, continuamente se enfrenta a retos de estructurar problemas mal identificados [48]. Esto debido a que los clientes, cuando se le realizan las entrevistas y encuestas no cuentan con la pericia necesaria para identificar y definir sus problemas con claridad. Por lo tanto, el ingeniero de diseño debe hacer un análisis e interpretación de las palabras del cliente potencial y luego definir el problema correctamente, para asegurar que cualquier solución propuesta resuelve eficazmente el problema [24], [25].

C. Prototipo construido

El concepto presentado en los resultados fue el que mayor puntaje obtuvo en la matriz de decisiones. Ganó debido al cumplimiento que tenía con cada una de las características que solicitaba el cliente. Este aparato es liviano y muy fácil de manejar, no es eléctrico, es bastante accesible, por lo que cualquiera persona lo puede tener. Las medidas generales del dispositivo es de 280 mm x 280 mm x 80 mm. El ruido al trabajar es casi inexistente, se puede desarmar y armar fácilmente.

D. Requisitos de los clientes e ingenieriles.

Los requisitos de los clientes colocados en la Casa de la Calidad se suministraron por medio de encuestas hechas a los potenciales usuarios del producto. El grupo de trabajo tuvo la tarea de interpretar los deseos de cada cliente potencial. Luego del análisis de las encuestas, se llevó a la conclusión que los requisitos del cliente eran costo, tamaño, fácil uso, durable, desarmable, sin electricidad, sin ruido, desechable y peso. Cada requisito del cliente debe emparejarse con uno o más requisitos ingenieriles. La diferencia entre los requisitos ingenieriles y de los clientes es que los ingenieriles poseen unidades medibles. Se emparejaron de la siguiente manera:

TABLA IV
REQUISITOS DE CLIENTES VERSUS INGENIERILES.

Requisitos de clientes	Requisitos ingenieriles	Unidad
Costo	Dinero	Dólares estadounidenses
Tamaño	Dimensión	Metros
Fácil uso	Peso	Kilogramos
	Dimensión	Metros
Durable	Vida útil	Años
Desarmable	Dimensión	Metros
Sin electricidad	Intensidad de corriente	Amperes
Sin ruido	Intensidad sonora	Decibeles
Peso	Peso	Kilogramos
Desechable	Intensidad de corriente	Amperes
	Dimensión	Metros

E. Diferencia con estado de arte previo (patentes).

La diferencia entre el diseño del prototipo presentado en esta investigación y el encontrado en el estado de arte previo [24]–[26] es en el mecanismo de abrir y cerrar los soportes estructurales. Este mecanismo hace posible que el dispositivo pueda adaptarse a diferentes espesores de cristales, está característica no la posee las patentes encontradas.
Las patentes más similares a la tecnología de este trabajo se encontraron que sus estructuras son rígidas, por lo tanto, solo pueden limpiar en un espesor de cristal predeterminado.

F. Etapas del ciclo de vida del aparato modular que limpia persianas

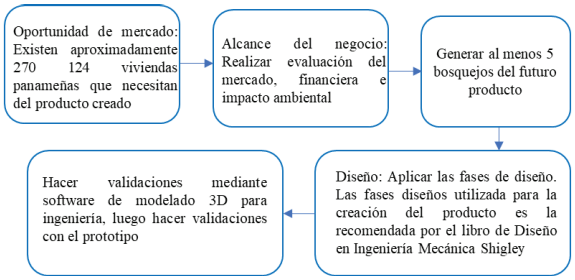


Fig. 8. Fase de introducción al mercado del aparato modular para la limpieza de persianas

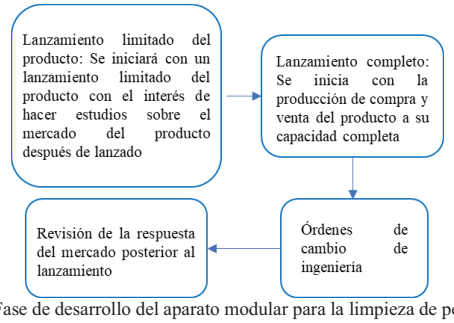


Fig. 9. Fase de desarrollo del aparato modular para la limpieza de persianas.

.

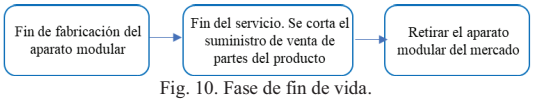


Fig. 10. Fase de fin de vida.

G. Valorización en el fin de vida del producto.

Inspirado en negocios como el de la compañía Gerrard Street en la cual no solamente te venden un producto, sino que te venden un servicio de larga duración [52], [53].
El diseño modular del aparato limpiador de persianas permite que las piezas que se dañen pueden ser fácilmente cambiadas por otra. Para que el futuro producto pueda contar con un servicio de suscripción donde el usuario paga una mensualidad. Por la cual la meta de este diseño es que sea totalmente modular y donde todas las piezas se puedan reparar, reutilizar o reciclar. Este servicio permitirá al usuario enviar la pieza dañada a la empresa (la cual se encarga de

reutilizarla, repararla o reciclarla) y esta se encargará de enviarle al usuario la pieza correspondiente funcional. Y así, se utilizan menos materia prima para ser nuevos aparatos o partes del mismo.

H. Direcciones futuras.

Se están desarrollando tres patentes para ser enviadas a Dirección General del Registro de la Propiedad Industrial de Panamá.

Número de solicitud: 93945 presentado al Ministerio de Comercio e Industrias, República de Panamá.

VII. Conclusión

Este trabajo exploró el diseño para la manufactura de un producto específicamente el de un dispositivo modular para la limpieza de persianas de vidrio y que paralelamente ayuda como guía para la creación de un producto. Se proporcionó recursos para los grupos desarrolladores de productos y se dispuso una trayectoria para la innovación. Para lograr este proyecto se tuvieron que seguir las fases de diseño mecánico, las cuales son iterativas. Estas iteraciones nos permiten cada vez agregar mejoras al producto final, por lo cual es beneficioso tanto para la empresa creadora de la tecnología como para el cliente. Este artículo se ha enfocado más en el diseño, desarrollo y manufactura de la tecnología, los cuales son los grupos núcleos de una empresa creadora de productos. Se espera que el personal de la empresa sea interdisciplinario y tengan competencias en ingeniería eléctrica, mecánica, investigación de mercado, operaciones de manufactura y otros. Entre más áreas involucradas estén, mejor será el resultado final.

Los pasos de diseño utilizados en la metodología para el desarrollo de este producto no es el único que existe en el campo de la ingeniería; el enfoque que se describe en este trabajo es una de las muchas posibilidades.

Referencias

[1] K. T. Ulrich, *Product design and development*. Tata McGraw-Hill Education, 2003.

[2] J. Alcaide Marzal, *Diseño de producto*. Biblioteca Hernán Malo González, 2004.

[3] L. Brownsword and P. Clements, "A Case Study in Successful Product Line Development.," CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA SOFTWARE ENGINEERING INST, 1996.

[4] M. Baxter, *Product Design*. CRC Press, 1995. doi: 10.1201/9781315275246.

[5] P. Fifield, *Marketing strategy*. Routledge, 2012.

[6] N. A. Morgan, K. A. Whitler, H. Feng, and S. Chari, "Research in marketing strategy," *J Acad Mark Sci*, vol. 47, no. 1, pp. 4–29, 2019.

[7] F. v Cespedes and N. F. Piercy, "Implementing marketing strategy," *Journal of Marketing Management*, vol. 12, no. 1–3, pp. 135–160, 1996.

[8] S. Pugh, *Integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley, 1990.

[9] S. Tickoo, *Autodesk inventor professional 2018 for designers*. CADCIM Technologies, 2017.

[10] D. G. Ullman, T. G. Dietterich, and L. A. Stauffer, "A model of the mechanical design process based on empirical data," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 2, no. 1, pp. 33–52, Feb. 1988, doi: 10.1017/S0890060400000536.

[11] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. A. Knight, *Product design for manufacture and assembly*. CRC press, 2010.

[12] Helmut Sy Corvo, "Análisis de la oferta," *https://www.lifeder.com/analisis-oferta/*, 2017.

[13] D. Kaczynski, M. Salmona, and T. Smith, "Qualitative research in finance," *Australian Journal of Management*, vol. 39, no. 1, pp. 127–135, 2014.

[14] T. Lagoarde-Segot, "Diversifying finance research: From financialization to sustainability," *International Review of Financial Analysis*, vol. 39, pp. 1–6, 2015.

[15] J. J. Uicker, G. R. Pennock, J. E. Shigley, and J. M. Mccarthy, *Theory of machines and mechanisms*, vol. 768. Oxford University Press New York, 2003.

[16] L. L. Bucciarelli and L. L. Bucciarelli, *Designing engineers*. MIT press, 1994.

[17] V. K. Mehta and R. Mehta, *Basic Electrical Engineering*. S Chand, 2012.

[18] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Essentials of materials science and engineering*. Cengage Learning, 2018.

[19] B. Wu, *Manufacturing systems design and analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.

[20] A. Hill, *Manufacturing Operations Strategy: Texts and Cases*. Bloomsbury Publishing, 2020.

[21] M. O'driscoll, "Design for manufacture."

[22] C. D. Naiju, "DFMA for product designers: A review," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 7473–7478. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.134.

[23] M. K. Thompson, I. K. Juel Jespersen, and T. Kjærgaard, "Design for manufacturing and assembly key performance indicators to support high-speed product development," in *Procedia CIRP*, 2018, vol. 70, pp. 114–119. doi: 10.1016/j.procir.2018.02.005.

[24] S. Hou, J. Gao, and C. Wang, "Design for mass customisation, design for manufacturing, and design for supply chain: A review of the literature," *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, vol. 4, no. 1. John Wiley and Sons Inc, pp. 1–16, Mar. 01, 2022. doi: 10.1049/cim2.12041.

[25] INEC, "Volumenn III: Características de las Viviendas y Hogares: 2010," *https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=357&ID_CATEGORIA=13&ID_SUBCATEGORIA=59*, 2010.

[26] J. E. Shigley, *Mechanical engineering design*. McGraw-Hill Companies, 1972.

[27] R. Budynas and J. Keith Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Eighth. México D.F., 2008.

[28] L. A. Stauffer and D. G. Ullman, "A comparison of the results of empirical studies into the mechanical design process," *Des Stud*, vol. 9, no. 2, pp. 107–114, Apr. 1988, doi: 10.1016/0142-694X(88)90036-1.

[29] M. R. Henderson and L. E. Taylor, "A meta-model for mechanical products based upon the mechanical design process," *Res Eng Des*, vol. 5, no. 3–4, pp. 140–160, Sep. 1993, doi: 10.1007/BF01608360.

[30] C. Kuehnl, "Cleaning device," US4718141A, Jun. 12, 1988

[31] J. H. Johnson, "Duster," US2271694A, Aug. 01, 1938

[32] R. I. Diggs, "Dustless blind brush," US2231802A, Feb. 11, 1941

[33] C. Adiano and A. v Roth, "Beyond the house of quality: dynamic QFD," *Benchmarking for Quality Management & Technology*, 1994.

[34] S. Murgatroyd, "The house of quality: Using QFD for instructional design in distance education," *American Journal of Distance Education*, vol. 7, no. 2, pp. 34–48, Jan. 1993, doi: 10.1080/08923649309526821.

[35] C. Jensen, J. D. Helsel, and D. Short, "Engineering drawing and design, Glencoe." Macmillan/McGraw-Hill, 1990.

[36] D. G. Ullman, S. Wood, and D. Craig, "The importance of drawing in the mechanical design process," *Comput Graph*, vol. 14, no. 2, pp. 263–274, Jan. 1990, doi: 10.1016/0097-8493(90)90037-X.

[37] P. Appendini and J. H. Hotchkiss, "Review of antimicrobial food packaging," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 113–126, Jun. 2002, doi: 10.1016/S1466-8564(02)00012-7.

[38] L. Serna and F. Albán, "Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones," *Ingeniería y competitividad*, vol. 5, no. 1, pp. 16–26, 2003.

[39] Amazon and Snapmarker, " Pasa el mouse encima de la imagen para aplicar zoom Snapmaker Impresora 3D modelo 2.0 F350 con un filamento PLA negro, función de impresión de reanudación DIY Impresoras 3D Tamaño de impresión 12.598 x 13.780 x 12.992 in, certificado ETL," *https://www.amazon.com/-*

/es/Snapmaker-Impresora-reanudaci%C3%B3n-Impresoras-certificado/dp/B09FLQY1WS?th=1, 2022.
[40] i.materialise, "Upload 3D Model," *https://i.materialise.com/en/3dprint*, 2022.
[41] Banco Mundial, "Panamá: panorama general," *https://www.bancomundial.org/es/country/panama/overview*, Apr. 07, 2022.
[42] L. Briskman, "Creative product and creative process in science and art," *Inquiry*, vol. 23, no. 1, pp. 83–106, 1980.
[43] N. Bonnardel, A. Wojtczuk, P.-Y. Gilles, and S. Mazon, "The creative process in design," in *The Creative Process*, Springer, 2018, pp. 229–254.
[44] R. L. Norton, *Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*. McGraw-Hill/Higher Education, 2008.
[45] G. L. Lilien, P. D. Morrison, K. Searls, M. Sonnack, and E. von Hippel, "Performance assessment of the lead user idea-generation process for new product development," *Manage Sci*, vol. 48, no. 8, pp. 1042–1059, 2002.
[46] J. J. Shah, "Experimental investigation of progressive idea generation techniques in engineering design," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 1998, vol. 80333, p. V003T03A004.
[47] H. Al-Samarraie and S. Hurmuzan, "A review of brainstorming techniques in higher education," *Think Skills Creat*, vol. 27, pp. 78–91, 2018.
[48] P. R. N. Childs, *Mechanical design engineering handbook*. Butterworth-Heinemann, 2013.
[49] J. H. Johnson, "Duster," US2271694A, Aug. 01, 1938
[50] R. I. Diggs, "Dustless blind brush," US2231802A, Feb. 11, 1941
[51] C. Kuehnl, "Cleaning device," US4718141A, Jun. 12, 1988
[52] "Headphones as a service: Gerrard Street," *https://ellenmac1rthurfoundation.org/circular-examples/gerrard-street*, Aug. 05, 2021.
[53] "GERRAD STREET," *https://gerrardstreet.nl/*, May 03, 2020.

empresas en Panamá

Ricardo Caballero
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
ricardo.caballero@utp.ac.pa

Rolando Olmos
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
rolando.olmos@utp.ac.pa

Nathalia Martínez
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
natalia.martinez@utp.ac.pa

***Resumen*— En los últimos años, los entornos económicos, tecnológicos y socioculturales se han encontrado en constante cambio. Los clientes son más exigentes y están anuentes de las tendencias del mercado. Las empresas innovan sus procesos a través de la implementación de tecnologías que les permita optimizar operaciones y facilitar la interacción negocio cliente. Sin embargo, muchas empresas, especialmente las pequeñas y medianas, enfrentan dificultades para adaptarse a nuevos modelos de negocios. Incluso, existen empresas que no están dispuestas a cambiar la forma tradicional en que realizan sus operaciones comerciales diarias por lo que pueden presentar más desafíos en el mercado actual. La transformación digital ha provocado que las empresas reestructuren sus modelos de negocios en los últimos años. Actualmente, con la llegada de la COVID-19, muchos negocios se vieron afectados debido a la falta de digitalización en los procesos. Las pequeñas y medianas empresas se vieron obligadas a emprender en el E-Commerce para poder tener alcance con sus clientes y sobrevivir la competencia. Aun así, no todas las empresas han logrado implementar apropiadamente una estrategia de transformación digital para rediseñar sus estructuras y operaciones. En Panamá aún no existen estudios enfocados en el grado de digitalización de las pequeñas y medianas empresas. Este estudio tiene como objetivo describir el grado de digitalización de las empresas locales en la provincia de Chiriquí – Panamá.**

Palabras claves*— *Transformación digital, modelos de negocios, pequeñas y medianas empresas

***Abstract*— In recent years, the economic, technological, and sociocultural environments have been in constant change. Customers are more demanding and aware of market trends. Companies innovate their processes through the implementation of technologies that allow them to optimize operations and facilitate business-client interaction. However, many companies, especially small and medium-sized enterprises, face difficulties in adapting to new business models. There are even companies that are not willing to change the traditional way they carry out their daily business operations, which can present more challenges in today's market. The digital transformation has caused companies to restructure their business models in recent years. Currently, with the arrival of COVID-19, many businesses have been affected due to the lack of digitization in the processes. Small and medium-sized companies were forced to embark on E-Commerce in order to reach their customers and survive the competition. Still, not all companies have managed to properly implement a digital transformation strategy to redesign their structures and operations. In Panama there are still no studies focused on the degree of digitalization of small and medium-sized companies. This research aims to describe the degree of digitalization of local companies in the province of Chiriquí – Panama**

Keywords*— *Digital transformation, business model, small and medium sized enterprises

I. INTRODUCTION

En los últimos años, el entorno empresarial ha ido cambiando radicalmente debido a la introducción de conceptos y tecnologías basadas en la cuarta revolución industrial [1]. Los rápidos cambios en la competencia, la demanda y la tecnología, hacen que sea más importante que nunca que las organizaciones puedan responder y adaptarse a su entorno. En este contexto, la presión sobre las empresas por alinear su estrategia de negocio con la transformación digital del entorno se ha incrementado significativamente [2]. De acuerdo con Henriette et al. [3], la transformación digital puede definirse como un proceso de cambio disruptivo o incremental que comienza con la adopción y el uso de tecnologías digitales y evoluciona hacia una transformación holística implícita de una organización. Morakanyane et al. [4] agregan que la transformación digital es un proceso evolutivo que aprovecha las capacidades y tecnologías digitales para permitir que los modelos comerciales, los procesos operativos y las experiencias de los clientes creen valor.

Actualmente con la llegada de la COVID-19, las empresas a nivel mundial se encuentran en ambientes de mucha incertidumbre [5]. La economía se ha visto fuertemente afectada como resultado de las estrictas medidas implementadas al inicio de la pandemia que trajeron consigo la baja o nula actividad comercial para diversas empresas [6]. La situación actual desencadena cambios en el comportamiento de los clientes, el equilibrio del mercado y las cadenas de suministro, y las tecnologías digitales pueden ayudarlos a aprovechar esta ventana de oportunidad [7]. De acuerdo con Klein & Todesco [8] las pequeñas y medianas empresas presentan las siguientes debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades para enfrentar los desafíos de la COVID-19:

Fortalezas	Debilidades
• Ambidestreza organizacional • Resilencia (adaptabilidad) • Alianzas estratégicas • Estrategias a corto plazo	• Brecha de conocimiento tecnológico • Falta de recursos financieros • Pérdida de conocimiento organizacional • Conocimientos administrativos limitados • Accesibilidad a financiamiento
Oportunidades	**Amenazas**
• Redes sociales (C2B) • Innovación abierta • Cadenas de valores globales • Nuevos nichos de mercado • Tecnologías digitales	• Retraso en el retorno de la inversión • Subutilización de tecnologías digitales • Generatividad de las redes sociales • Nuevos participantes en el mercado

Tabla 1. FODA general para que las PYMES enfrenten la transformación digital y la pandemia de COVID-19 (adaptado de [8]**)**

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00025

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico [9], resultados de encuestas a nivel global apuntan a que hasta el 70 % de las pequeñas y medianas empresas han intensificado su uso de las tecnologías digitales debido a la llegada de la COVID-19. Desafortunadamente, algunas empresas no han tenido el tiempo o la guía necesaria para planificar bien esta transición: para seleccionar los sistemas digitales correctos, actualizar las habilidades digitales, desarrollar las protecciones y la seguridad adecuadas, y personalizar y comprender completamente el potencial de estas nuevas herramientas [10]. Muchos gerentes afirman que son conscientes de la necesidad y urgencia de reaccionar, pero tienen poca orientación para determinar el curso de acción correcto y luchan constantemente por mantenerse al día con la nueva realidad digital [11], [12].

En Panamá las pequeñas y medianas empresas desde hace muchos años se han caracterizado por mantener un modelo de negocio tradicional y poco digitalizado. El ambiente de negocio de las PYMES es caracterizado por una falta de dinamismo. Según estadísticas proporcionadas por el Índice de Competitividad Global [13], Panamá solo cumple cuatro de los doce pilares de competitividad; siendo estos, estabilidad macroeconómica, salud, mercado de productos y sistema financiero. No obstante, el país presenta posiciones rezagadas en temas como instituciones, infraestructura, habilidades, mercado laboral, tamaño de mercado, dinamismo empresarial, adopción de tecnología y capacidad de innovación.

De acuerdo con el estudio del año 2015, La Microempresa en Panamá [14], realizado a 216 empresas y desarrollado por La Red Internacional de Investigadores en PYMES, se definen las siguientes características: la mayoría de las micro, pequeña y mediana empresa son individuales o familiares, solo un poco más de la mitad están registradas legalmente. Su locación usualmente es en zonas residenciales donde el 48% se ubica en la vivienda del propietario y dirigidas por en su mayoría por hombres de edad promedio a los 47 años. El 37% de los dueños cuenta con algún nivel universitario y el 36% con educación básica o media. Por otra parte, la mayoría de sus dueños no sabe si su negocio tiene ganancias o pérdidas dado que no manejan indicadores o no llevan control detallado de sus costos. En cuanto al uso de tecnología, el 91% de las micro pequeñas y medianas empresas cuentan con celular, solo el 56% posee teléfono fijo, un 42.6% tienen correo electrónico (e-mail), 24.5% usan banca electrónica y apenas un 14.4% dispone de página web. Además, los empresarios valoran más la capacitación de los trabajadores en otras áreas, siendo las de menor importancia el área informática y nuevas tecnologías. Estos factores afectan de manera significativa en aspectos como: innovación tecnológica, en los requisitos del mercado, en la competencia, en los clientes, en los factores sociales, en la evolución de los sistemas de negocios, en la creación de nuevas filosofías de fabricación y de gestión. este estudio muestra que las empresas jóvenes tienen mejores condiciones que las maduras con respecto a tecnología; aunque los porcentajes son bajos de igual manera. Por otra parte, existen diferentes barreras que influyen en la creación y el crecimiento de las mismas como lo son: bajo nivel de capacidad tecnológica, limitado capital humano calificado; bajo nivel de tecnología; bajo nivel de investigación y desarrollo (I + D), alto nivel de competencia internacional, aspectos legales; financiación de puesta en marcha, la falta de ahorro y acceso al crédito.

Un reciente estudio denominado Impacto Económico de la Crisis COVID-19 sobre la MIPYME en Panamá (2021), desarrollado por el Centro Nacional de Competitividad confirma los resultados del estudio predecesor en aspectos como el control de la gestión de la empresa siendo de carácter familiar y en su mayoría dirigida por hombres. Brinda información sobre la cantidad promedio de años en operación siendo 14 aproximadamente. Además, incluye aspectos sobre las afectaciones debido a la pandemia; se obtuvo como resultado que el empleo disminuyó para el 67.1% de las empresas. De igual manera, la mayoría de las empresas (86%) manifestó que sus ventas redujeron durante pandemia. Sin embargo, este estudio no muestra aspectos referentes a temas como tecnología y digitalización [15].

De acuerdo con un estudio realizado por McKinsey & Co. los consumidores se han movido drásticamente hacia los canales virtuales. Los resultados confirman el rápido cambio hacia la interacción con los clientes a través de canales digitales. También muestran que las tasas de adopción están años por delante de lo que eran cuando se realizaron encuestas anteriores, e incluso más en los países desarrollados de Asia que en otras regiones. Muchas empresas reorientaron sus ofertas para brindar accesibilidad y facilidad a través del uso de herramientas digitales [16].

Las empresas necesitan introducir nuevos tipos de estrategias de operacionales innovadoras y digitales para mantener la ventaja competitiva actual a largo plazo [1]. Para ello, es necesario determinar primeramente el estado actual respecto al nivel de madurez para poder entender que hay y que falta por hacer. La descripción de la madurez digital de una empresa puede contribuir a la transformación organizacional y la renovación de sus competencias ya que documentan el status quo de la empresa, y este, funciona como guía inicial para el cambio organizacional [17].

II. METODOLOGÍA

La muestra se obtuvo mediante un muestreo aleatorio. Los criterios de estratificación son caracterizados por que toman en cuenta los objetivos del estudio, la información que se encuentra disponible y los recursos para aplicación de la empresa. En esta investigación se fijó una muestra aleatoria de las pequeñas y medianas empresas de diversos sectores. La muestra 55 empresas fue obtenida de las 511 empresas establecidas en la cámara de comercio e industrias de Chiriquí, esto permitió determinar el estado actual respecto a la operación y el nivel de madurez de las empresas en Chiriquí [18]. La información fue recogida mediante una encuesta virtual que fue enviada a los correos de cada empresa dirigido a cada gerente o dueño de estas. El estudio se realizado durante los meses febrero y marzo del 2021. Atendiendo los objetivos de la investigación, fueron seleccionadas las diferentes variables que serán aplicadas en la investigación de análisis empírico en las micro, pequeñas y medianas empresas de la provincia de Chiriquí. Por lo que se realizó un cuestionario dirigido a los gerentes, colaboradores o dueños de diferentes empresas para obtener la información de manera más precisa y clara de las variables objeto de estudio. Para su elaboración se analizó detenidamente la estructuración de este, para que se pueda

extraer la información de manera breve. El cuestionario consta de 72 preguntas, subdividas en 5 secciones tales como se muestra en la Tabla 1

Sección	Tema	Números de preguntas
1	Datos generales de la empresa	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12
2	Gestión de operaciones	13,14,15,16,17,18,19,20, 21,22,23,24,25,26,27,28, 29,30,31,32
3	Recursos de tecnología de información (TI)	33,34,35,36,37,38,39,40, 41,42,43,44
4	Transformación digital empresarial	45,46,47,48,49,50,51,52, 53,54,55,56,57,58,59,60, 61,62,63
5	Implementación de nuevas tecnologías	64,65,66,67,68,69,70,72

Tabla 2. Secciones y preguntas del cuestionario

En la primera sección se describen datos generales de la empresa como, por ejemplo: el sector al que pertenece, la cantidad de trabajadores para determinar si es micro, pequeña y mediana empresa, años de operación y datos que relacionan a los colaboradores con la empresa como nivel de grado académico o si dispone de una licenciatura para laborar. Además, tipos de medios de comunicación tiene la empresa para mostrar presencia ante el público.

La segunda sección trata sobre la de gestión de operaciones donde se busca determinar cómo funciona actualmente la cadena de valor en la empresa y se busca identificar los obstáculos comunes que presentan los diversos sectores de la región. Para ello se define que tipos de procesos mantienen las empresas o si tienen estructuras organizacionales establecidas para saber cómo ellos manejan la organización y así descubrir cuales son los mayores problemas de la empresa.

En la tercera sección acerca de recursos de tecnología de información (TI), se pretende conocer con que equipos (hardware) cuenta la empresa para la realización de sus actividades, si dispone de servicio a internet o que recursos físicos dispone dentro de la empresa, y si planean invertir en nuevos equipos para aumentar la digitalización dentro de la misma.

La cuarta sección se enfoca en los canales o medios de comunicación que tienen las mismas para interactuar con los clientes y dar a conocer la propuesta de valor. Además, también se enfoca en la relación existente entre los proveedores, clientes finales y otros participantes.

En la última sección acerca de la implantación de nuevas tecnologías, se busca determinar el nivel de conocimiento sobre nuevas tecnologías y sus beneficios en la optimización de las operaciones diarias en las empresas, así como la intención de implementación en algún momento por parte de la empresa. Se realizan preguntas referentes que áreas beneficiarían la implementación de tecnologías digitales y el nivel de interés de las empresas en implementarlo.

Para recolectar la información se utiliza la herramienta Microsoft Forms por el cual se envía el cuestionario de manera digital a los encuestados. Dicha información se recolecta automáticamente y almacena en una hoja de Excel la cual utiliza dichos datos para realizar los análisis descriptivos correspondientes.

III. RESULTADOS

En esta sección se efectúa una descripción de las características de las pequeñas y medianas empresas en la región de Chiriquí, Panamá. En ese sentido se examinan distintas características generales y operacionales.

A. Datos generales de las empresas

Los datos reflejan que, de las 55 microempresas encuestadas, el 36% fue llenada por colaboradores con un nivel de gestión táctico y 35% con un nivel operativo mientras que el resto posee un nivel estratégico. Esto indica que el análisis se basa en información recolectada de diferentes niveles de gestión de las PYMES encuestadas. De las empresas encuestadas, el 23.64% se dedican a venta en menudeo o detallista, empresa comercial o persona en régimen de autónomo que vende productos al consumidor final (comercio minorista). Un 10.91% de los encuestados se desempeña como centro de distribución o transporte multimodal (logística). Mientras que los sectores construcción, venta de materiales, ferreterías, agroindustrial, farmacéuticas representan un 7.27% cada uno. En la Tabla 2 se pueden observar las otras industrias que participaron de este estudio.

Tipo de industria	Porcentaje de los encuestados
Comercio minorista	23.64%
Logística	10.91%
Construcción, venta de materiales y ferretería	7.27%
Agroindustrial	7.27%
Farmacéuticas	7.27%
Sector público y gubernamental	5.45%
Servicios de la salud	5.45%
Ingeniería Mecánica	5.45%
Telecomunicaciones	5.45%
Agricultura; plantaciones; sectores rurales	3.64%
Servicios profesionales	1.82%
Hotelería y turismo	1.82%
Industria del petróleo y gas	1.82%
Producción de alimentos	1.82%
Servicios de mantenimiento y reparación de equipos electrónicos, eléctricos e informáticos	1.82%
Restaurantes y venta de comida rápida	1.82%
Servicios públicos	1.82%
Control de plagas	1.82%
Seguros privados	1.82%
Librería y servicios de copiados	1.82%

Tabla 3. Clasificación del tipo de industria según actividad económica

En cuanto a la cantidad empleados que trabajaban en la empresa, el 45.45% de las empresas encuestadas está compuesta por menos de 10 colaboradores, mientras que un 27.27% está compuesta por 11 a 35 colaboradores, el 18.18% más de 100 colaboradores y un 9.09% de 36 a 100 colaboradores. La mayoría de las empresas encuestadas, el 70.91% específicamente, lleva menos de 20 años de operación. Es notable resaltar que un 21.82% de estas solo lleva menos de 5 años en actividad comercial; por consiguiente, casi un cuarto de las empresas son relativamente jóvenes. Un 10.91% lleva entre 20 y 40 años de operación mientras que 18.18% lleva operando más de 40 años en el mercado. La Figura 1 muestra la distribución de empresas por antigüedad de operación.

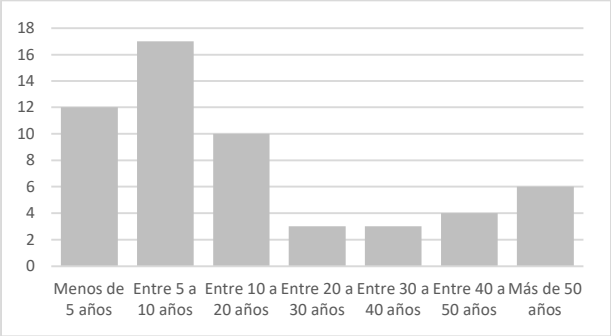


Figura 1. Cantidad de años en operación de la empresa

En base a los resultados, la mayoría de las empresas encuestadas (50.94%) se clasifican como Microempresa. El 22.64% fueron grandes empresas y el 26.42% pequeñas y medianas empresas. La Tabla 3 resume los resultados

Ingreso bruto anual promedio	Porcentaje de los encuestados	Clasificación*
Menor que $150,000.00	50.94%	Microempresa
Entre $150,000.01 hasta $1,000,000.00	18.87%	Pequeña empresa
Entre $1,000,000.01 hasta $2,500,000.00	7.55%	Mediana empresa
Mayor que $2,500,000.00	22.64%	Gran empresa
*de acuerdo con la Ley N°33 de 25 de julio de 2000 de la República de Panamá		

Tabla 4. Clasificación de las empresas según su tamaño

En cuanto el nivel educativo de los colaboradores, del total de empleados registrados por las empresas encuestadas, el 43% son colaboradores con técnico o bachiller de colegio, 29% egresados a nivel de licenciatura y 11% no cuenta con ningún grado académico. Es notable también observar que un 17% de los empleados de las empresas encuestadas cuenta con un título de Postgrado, Especialización o Maestría. Se puede recalcar que solamente 2 colaboradores cuentan con un título de doctorado, de un total de 3621 registrados.

Por último, en cuanto al el medio de comunicación utilizado para mantener contacto ante los clientes y la comunidad, un 41.82% manifestó contar con sitio web propio mientras que un 18.18% respondió no contar con ningún medio digital sea redes sociales ni sitio web. Otro 41.82% manifestó contar con redes sociales como Instagram, WhatsappBusiness, Twitter, Facebook, LinkedIn y Youtube.

B. Gestión de operaciones

En esta sección se describen aspectos operacionales de las empresas encuestadas. Un factor importante para mantener alta competitividad es medir indicadores que permitan analizar el rendimiento actual y en base a ello encontrar mejoras. Basado en los resultados, el 85.45% de las empresas encuestadas manifiesta llevar métricas de desempeño para la toma de decisiones como lo son: tasa de servicio, utilización, tasa de producción, tiempo de procesamiento, tiempo de espera y número de clientes que debe poder atender una instalación en un periodo de tiempo. Mientras que el 14.55% de manifiesta no utilizar ninguna métrica de desempeño para la toma de decisiones. Cabe mencionar que, de este porcentaje, el 75% son microempresas. Para poder llevar control de indicadores es necesario conocer cómo se realizan las operaciones diarias. El 70.91% de las empresas manifestó tener sus procesos claramente definidos y documentados. Un 20% respondió que los procesos individuales se ejecutan de manera diferente en los departamentos. Finalmente, un 9.09% respondió que sus procesos no se encuentran definidos ni documentados. De estos, un 60% es conformado por microempresas, y un 20% conformado mediana empresa y por gran empresa respectivamente.

Con respecto al formato de diagramación de los procesos de la empresa, el 47% de los encuestados respondió tener sus procesos esquematizados digitalmente, mientras que un 45% cuenta con procesos diagramados manualmente. Además, un 7% manifiesta que sus procesos internos no coinciden con los procesos diagramados en el sistema de tecnología de información (IT). Finalmente, se preguntó a las empresas si existen estructuras y responsabilidades claras en cada uno de sus procesos; por lo que el 90% respondió que sí y el otro 9% respondió que no.

Dentro de esta sección del estudio, también se buscó determinar cuáles son los departamentos dentro de las PYMES que presentan mayores problemas o dificultades con relación a su gestión de ventas, aprovisionamiento, producción, almacenaje, distribución y su gestión de servicio al cliente. Los resultados muestran que, el 55.30% de las empresas mencionan que el departamento de ventas presenta muy pocos problemas para operar; mientras que el 27.6% menciona que este departamento presenta algunos o muchos problemas. Con respecto al departamento de distribución y transporte, solamente un 38.60% de las empresas manifestó no tener problemas con esta operación y un 61.40% mencionó que existen de pocos a muchos problemas operacionales dentro de este departamento. El resumen de los resultados se puede observar en la Figura 2

Otro aspecto importante para el análisis es determinar qué procesos se realizan de manera manual, de manera digital o se realizan de ambas maneras. Para ello, se categorizaron las actividades más comunes desempeñadas en las empresas y se obtuvieron los siguientes resultados (ver Figura 3). Se puede observar que la mayoría de las empresas realizan sus actividades de manera manual y digital ya que esta opción ocupa el mayor porcentaje de respuestas, siendo en su mayoría más del 30%. Con respecto a la gestión de pago a proveedores, el 14% realiza sus procesos de manera manual, el otro 23% realiza sus procesos de manera digital y por último el 64% del resto de las actividades se realiza de ambas formas. En el departamento de mantenimiento, el 39% realizan sus procesos manualmente, el 16% de manera digital y el ultimo 46% utiliza ambos procesos. En registro de fallas el 48% de las empresas lo hacen de manera manual, el 14% lo hace de manera digital y por último resto de los procesos representan un 39% donde utilizan ambos procesos. En la gestión de reclamo el 33% de las empresas en esta área hacen los procesos de manera manual, 21% de manera digital y el 47% de los procesos en esta área lo hacen utilizando ambas de manera manual o digital. En el departamento de control de inventario un 30% realiza dichos procesos de manera manual, más sin embargo el 32% si realizan los procesos de manera digital, el resto de las actividades de este departamento sus procesos son de manera digital, el ultimo 38% de dicha actividad usa ambos procesos. En la actividad orden de entrega de mercancía el 41% de las actividades que realizan ahí las microempresas son procesos manuales, y los otros

30% sus procesos son digitales y utilizan ambas. En el proceso de facturación el 15% de los procesos que ellos realizan son manuales, el 39% son digitales; por último, el 46% utilizan ambos procesos. En la recepción de pago por servicios el 16% sus procesos son manuales, el 22% efectúan sus procesos de manera digital y por el ultimo el mayor porcentaje de dicha actividad utilizan ambos procesos para llevarla a cabo. En el área de gestión de preventa el 28% utilizan sus procesos manualmente, el 30% sus procesos son digitales y por último el 42% llevan a cabo ambos procesos. En orden de trabajo atendida el 30% realiza sus actividades con procesos manuales, el 26% son procesos digitales y por último 44% lleva a cabo utilizando ambas maneras. En la recepción de orden de compra utiliza un 32% lleva cabo los procesos de manera manual, un 28% procesos digitales y por último un 40% lleva a cabo sus procesos de ambas formas. Por último, en el área de registro de mercancía un 32% lleva a cabo de manera manual sus procesos, el 19% de manera digital y por último un 40% realiza sus procesos de ambas maneras. Es notable la redundancia en los procesos dado que todas las empresas encuestadas respondieron hasta cierto porcentaje realizar sus actividades de ambas maneras, digital y manual.

C. Recursos de tecnología de la información (IT)

Para una transformación digital exitosa, las empresas deben centrarse en dos actividades complementarias: remodelar las propuestas de valor del cliente y transformar sus operaciones utilizando tecnologías digitales para una mayor interacción y colaboración con el cliente [19]. En esta sección se busca conocer los recursos tecnológicos físicos y software, que utilizan las empresas de la región para llevar a cabo sus operaciones diarias. Primeramente, el 91% de las empresas encuestadas cuentan con conexión a Internet mientras que el 9% no tiene acceso a la red. Con respecto a recursos físicos tecnológicos la mayoría de las empresas cuentan con laptops, computadoras de escritorio, celular, impresora y tabletas. La Figura 4 resume estos datos.

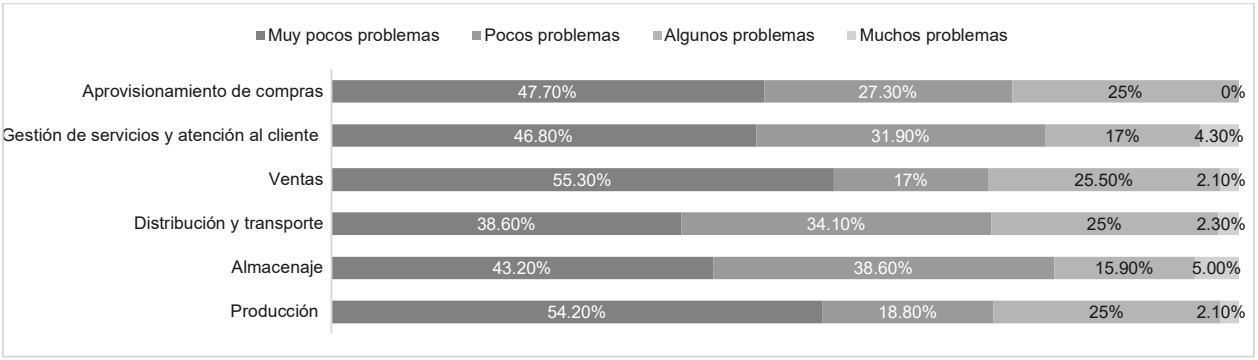


Figura 2. Departamentos que presentan mayores problemas

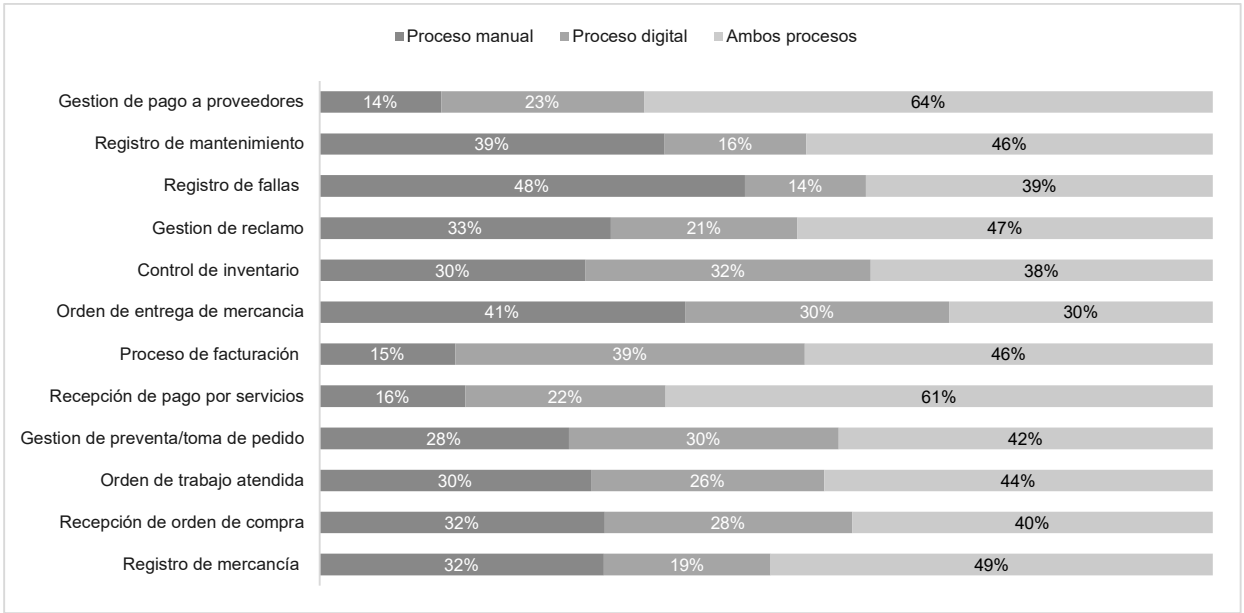


Figura 3. Forma en que se realizan los procesos dentro de la empresa

El 43.64% de las empresas encuestadas no dispone de softwares para la gestión de procesos empresariales y un 9.09% no respondió esta pregunta. Del 47.27% de las empresas que utilizan sistemas informáticos de gestión, entre los más utilizados se pueden SAP, ORACLE, Microsoft Dynamic y softwares desarrollados a la medida de la empresa. Algunos menos populares en las respuestas fueron Zoho, Netsuit, Cellbyte, Google Cloud IoT, PSKloud Software. De este porcentaje, el 15.38% manifiesta no estar satisfechos con su infraestructura de tecnologías de la información y el 34.62% menciona tener muchos sistemas diferentes en la empresa que no se encuentran conectados entre sí; es decir no tienen un sistema de informático de gestión de recursos interdepartamental. El 42.31% cree que la infraestructura de su sistema actual no se encuentra preparada o bien equipada para enfrentar los desafíos futuros de la digitalización.

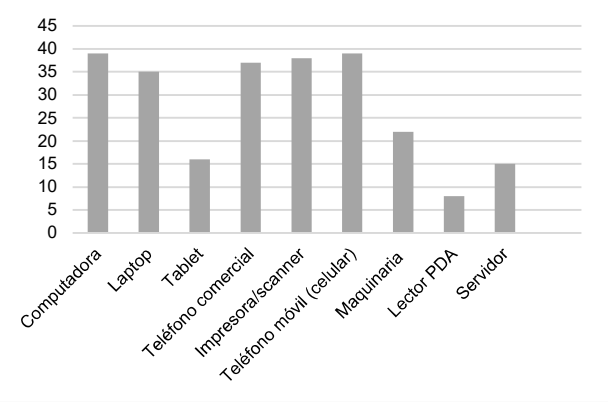


Figura 4. Recursos tecnológicos utilizados

En general, el 50% de las empresas manifestaron que planean invertir en mejores o nuevas infraestructuras de sistemas de tecnologías de la información en un futuro próximo. Entre los proyectos de inversión mencionados están la adaptación u optimización del sistema ERP existente, la implementación de servicios computarizados en la nube (Cloud Computing) y la introducción de nuevos sistemas ERP y nuevas infraestructuras IT. Además, el 84.62% manifiesta contar con personal capacitado para el manejo de tecnologías. Finalmente, se determinó el nivel de uso que las empresas le dan a sus datos clasificándolos de la siguiente manera (ver Figura 5):

- Nulo: Los datos solo están disponibles localmente y no son consistentes
- Limitado: Los datos son inconsistentes, se puede proporcionar cierta integración, pero un valor limitado a través del análisis de datos
- Básico: Los datos son algo robustos y permiten cierta automatización y análisis para la toma de decisiones
- Intermedio: Los datos son sólidos, bien integrados y respaldan una amplia gama de decisiones de gestión.
- Avanzado Los datos son completamente robustos, ampliamente accesibles e impulsan el análisis y la automatización para respaldar la toma de decisiones estratégicas

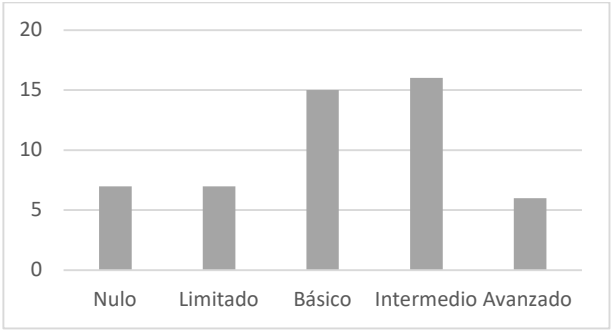


Figura 5. Medida en que los datos son utilizados para brindar información estratégica

D. Transformación digital empresarial

La implementación de tecnologías en las operaciones empresariales es solo una pequeña parte de la transformación digital de un negocio. Las tecnologías digitales deben crear valor adicional para los clientes, el negocio en sí y otras partes interesadas esenciales [20]. En esta sección se busca identificar aquellos canales o medios de comunicación que utilizan las compañías para interactuar con su segmento de clientes y conocer aquellos aspectos, estrategias, planes u herramientas digitales como infraestructura mínima y adecuada de las TIC que planean utilizar como medio de comunicación rápido, eficiente, permanente y de bajo costo para transmitir a los empresarios y sus colaboradores la información relativa en esos temas.

El 67.7% de las empresas manifestó estar de acuerdo en que su organización tiene una visión clara sobre la transformación digital empresaria. Un 30.91% respondió que su empresa no tiene una visión clara con respecto a la transformación digital y un 1.82% no tiene conocimiento sobre el tema. El objetivo de la visión de transformación digital de las mismas está relacionado en su mayoría a reducir costos, aumentar el rendimiento y la conectividad.

Se les preguntó a las empresas encuestadas, como calificarían la madurez la madurez de su visión sobre la transformación empresarial en base a los siguientes niveles:

Nivel	Porcentaje
Avanzado: Existe una estrategia bien definida, alineada con los objetivos comerciales y en ejecución	12.96%
Intermedio: La estrategia se ha desarrollado en gran medida y ahora se está perfeccionando para ofrecer resultados comerciales específicos.	29.63%
Básico: Está surgiendo una estrategia y las iniciativas se están alineando con los resultados comerciales acordados	51.85%
Nulo: Las ambiciones de negocio se entienden, pero no se apoyan en una estrategia integral de cadena de suministro digital	5.56%

Tabla 5. Madurez de la visión de la empresa sobre la transformación digital

En cuanto a que están motiva la transformación digital de las empresas, en su mayoría manifiestan la reducción de costos y los nuevos modelos de negocio. Otros manifiestan que su motivación es el "miedo a ser dejado atrás por la competencia".

En cuanto al nivel de inversión en proyectos de transformación digital empresarial en un mediano plazo (12 meses) la mayoría de los encuestados manifestó no destinar

más del 2% de sus ingresos mientras que otros no tienen esa inversión en consideración. La siguiente tabla resume los datos:

Inversión	Porcentaje
1-2% de los ingresos	35.19%
2-5% de los ingresos	16.67%
5% + de los ingresos	1.85%
Ninguno (0% de los ingresos)	9.26%
No se	37.04%

Tabla 6. Tabla 6. Nivel de inversión a mediano plazo en proyectos de transformación digital empresarial

Los factores que están limitando la agenda de transformación digital empresarial identificados en la encuesta son: "procesos diarios a los cuales le dan más prioridad", "culturalmente, nuestra organización siempre ha tardado en adoptar nuevas tecnologías", "ambigüedad en torno a la estrategia empresarial y el desempeño de la empresa". Entre los factores más votados que limitan la capacidad de las organizaciones para capturar valor de las oportunidades digitales existentes están: altos costos, otros problemas más urgentes, no existe una metodología clara, ambigüedad en torno a la toma de decisiones, fallos en la captura de valor de la tecnología.

Del total de los encuestados, el 60.38% respondió que sí tienen la combinación adecuada de habilidades y capacidades necesarias para lograr la transformación digital, mientras que un 32.08 % se ubica en una posición nutra y 5.66% no sabe.

También, se le les preguntó a las empresas que en qué etapa de la adopción digital para los procesos de su cadena de suministro consideraban se encontraban. La siguiente tabla resume las respuestas:

Etapa	Porcentaje
Avanzado: Ya hemos probado y escalado algunas tecnologías y continuamente estamos probando casos de uso que abarcan todas las funciones de la cadena de suministro.	13.73%
Intermedio: Actualmente estamos implementando una solución de escala y probando algunas otras seleccionadas en áreas donde vemos las mayores oportunidades	11.76%
Inicial: Estamos considerando algunos casos de uso ahora, pero se ha realizado un trabajo limitado	19.61%
Básico: Nos centramos en el desarrollo incremental y estamos probando casos de uso selectos y soluciones puntuales.	33.33%
Sin definir: Todavía no hemos considerado realizar una transformación digital en nuestra empresa	21.57%

Tabla 7. Etapa de la adopción digital para los procesos de la cadena de suministro

Finalmente, las empresas encuestadas describieron la madurez de su organización hacia la implementación tecnológica en base a los siguientes niveles:

- Avanzado: analizan activamente el mercado en busca de capacidad y adopta soluciones mientras prueban activamente casos de uso innovadores internamente.
- Intermedio: el enfoque se centra en el desarrollo incremental, es decir, probar casos de uso, evaluar la viabilidad y luego escalar la capacidad
- Básico: utilizan un enfoque tradicional, es decir, la selección de proveedores seguida de la entrega del proyecto; prueba de tecnología limitada
- Limitado: el enfoque se basa en la modernización de la tecnología o la mejora de los sistemas heredados
- Nulo: no tiene un enfoque para ofrecer soluciones digitales

En la Figura 6 se puede observar que el 63.46% mantiene una madurez básica, limitada o nula. Por otro lado, solamente el 36.54% manifiesta encontrarse en el desarrollo e implementación de soluciones digitales

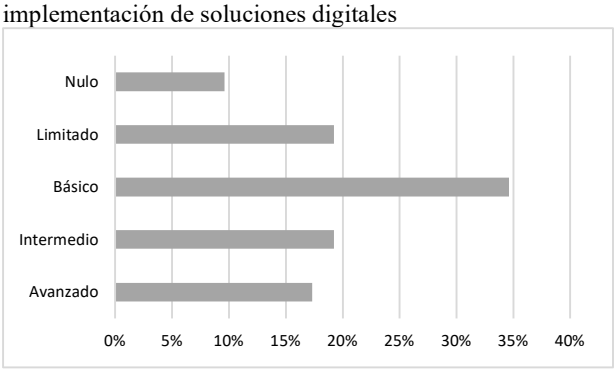


Figura 6. Madurez de la organización hacia la implementación de soluciones digitales

E. Implementación de nuevas tecnologías

Esta sección busca determinar el nivel de conocimiento sobre nuevas tecnologías y sus beneficios en la optimización de las operaciones diarias de las empresas, así como la intención de implementación en algún momento por parte de la empresa. La Industria 4.0 se denomina a la cuarta revolución industrial que trae consigo la interconectividad de los objetos ciber físicos para la optimización de los procesos a través de la utilización de datos [21]. A continuación, se describe el nivel de conocimiento de las empresas chiricanas en base a la Industria 4.0, donde es el 48% de las mismas no conocen dicho concepto mientras que solo el 17% afirmo conocerlo. Se le preguntó a los encuestados si es probable que su empresa sustituya alguna de sus tareas con el uso de la Industria 4.0 a lo que la mayoría respondió que es poco probable, solo un 13% dijo que es muy probable. También se cuestionó a cerca del costo-beneficio de implementar este tipo de sistemas digitalizados en un rango de $20,000 a $100,000 a lo que el 48% respondió que es muy costoso y un 42% que es un precio considerable y un 10% un costo accesible. Esto que indica que la mayoría de las PYMES en la región no están dispuestas a invertir mucho capital en este tipo de tecnología. Algunos beneficios que consideran las organizaciones al implementar tecnologías digitales en su cadena de suministro son: reducción de costos y aumento del rendimiento, siendo estas las opciones más votadas. En relación con el valor que esperarían tener las compañías mediante a adopción de tecnologías en la cadena de suministro la mayoría respondió: "no sabemos", esto evidencia la falta de conocimiento y análisis sobre los costos-beneficio de implementar estas tecnologías

IV. CONCLUSIONES

Del total de empresas existentes en Panamá, el 83% son PYMES que generan más del 26% de los empleos, el 9% de las remuneraciones y el algo más del 2% de los ingresos totales. La mayoría son de tipo familiar conformadas por pocos colaboradores. El tiempo de años de operación oscila entre los 5 a 20 años, por lo cual en su mayoría son empresas jóvenes y un poco menos de la mitad maduras

En cuanto el nivel educativo de los colaboradores, el 80% cuenta con trabajadores con un nivel de formación académica de bachiller o técnico y un 20% cuenta con colaboradores que no poseen ningún tipo de educación. En términos generales, las empresas califican de regular importancia la capacitación de sus trabajadores en cuanto a transformación digital para mejora de diversas áreas operacionales como: producción, comercial/marketing y en contabilidad. Para el resto de las áreas, la importancia asignada es mucho menor, lo que indica un bajo interés por la capacitación del personal en nuevas tecnologías usualmente por alto costo que conlleva esta implementación. A pesar de contar con herramientas TICs, muchos de los procesos se realizan todavía de manera manual. Algunas empresas encuestadas con más antigüedad de operación están interesadas en la adopción de nuevas tecnologías más complejas como sistemas RFID o realidad aumentada que faciliten los procesos dentro de su empresa.

En cuanto al nivel de madurez digital de las empresas, en áreas como planificación de recursos, un 33% manifiesta contar un nivel intermedio. Sin embargo, en áreas como producción, logística y aprovisionamiento, la mayoría de las empresas responde estar en un nivel básico en donde no todas sus operaciones se encuentran sintonizadas con los requisitos comerciales actuales, así como tampoco cuentan con sistemas integrados. De manera general se puede concluir que las empresas se encuentran en un nivel básico de transformación digital y que parte del reto, a pesar de los altos costos, es no contar con una guía por donde iniciar

Es importante tener en cuenta que, si bien la adopción acelerada de herramientas digitales puede ser positiva, ya sea para sobrellevar o superar la presión de los entornos empresariales o crisis pandémica, sigue existiendo una necesidad continua de asesoramiento, apoyo y orientación de fuentes confiables para consolidar la transición y explotar el potencial operacional de las empresas.

REFERENCIAS

[1] D. T. Matt, V. Modrák, and H. Zsifkovits, *Industry 4.0 for smes: Challenges, opportunities and requirements*. 2020.

[2] R. Teichert, "Digital transformation maturity: A systematic review of literature," *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, vol. 67, no. 6, pp. 1673–1687, 2019, doi: 10.11118/actaun201967061673.

[3] I. Henriette, E., Feki, M. and Boughzala, "Digital transformation and challenges," *Text. Netw.*, vol. 2018-May, no. 5–6, pp. 40–41, 2018.

[4] R. Morakanyane, A. Grace, and P. O'Reilly, "Conceptualizing digital transformation in business organizations: A systematic review of literature," *30th Bled eConference Digit. Transform. - From Connect. Things to Transform. our Lives, BLED 2017*, pp. 427–444, 2017, doi: 10.18690/978-961-286-043-1.30.

[5] O. V Arcia, "Comercio electrónico," 2020. https://www.prensa.com/economia/comercio-electronico/.

[6] R. Caballero *et al.*, "Uso De Aplicaciones Móviles Para Gestión De Pedidos Y Hábitos De Consumo En Restaurantes," *Congr. Nac. Cienc. y Tecnol. – APANAC*, no. June, pp. 464–470, 2021, doi: 10.33412/apanac.2021.3222.

[7] F. Ye, K. Liu, L. Li, K. Lai, Y. Zhan, and A. Kumar, "Digital supply chain management in the COVID-19 crisis : An asset orchestration perspective," no. January, 2020.

[8] V. B. Klein and J. L. Todesco, "COVID-19 crisis and SMEs responses: The role of digital transformation," *Knowl. Process Manag.*, vol. 28, no. 2, pp. 117–133, 2021, doi: 10.1002/kpm.1660.

[9] Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], "The Digital Transformation of SMEs," *OECD Publ.*, pp. 1–4, 2021, [Online]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/the-digital-transformation-of-smes_bdb9256a-en.

[10] J. Bumann and M. Peter, "Action fields of digital transformation–a review and comparative analysis of digital transformation maturity models and frameworks," *Digit. und And. Innov. im Manag.*, vol. 2, no. November, pp. 13–40, 2019.

[11] T. Hess, A. Benlian, C. Matt, and F. Wiesböck, "How German Media Companies Defined Their Digital Transformation Strategies," *MIS Q. Exec.*, vol. 15, no. 2, pp. 103–119, 2016.

[12] J. Bughin and N. Van Zeebroeck, "Does digital transformation pay off? Validating strategic responses to digital disruption," *Acad. Manag. Proc.*, vol. 2017, no. 1, p. 15155, Aug. 2017, doi: 10.5465/AMBPP.2017.15155abstract.

[13] I. Halman, R. Piper, R. Durán, and N. Tam, "Índice de competitividad Global y la COVID-19," Panamá, 2020.

[14] J. Mojica, E. González, and A. Cruz, *La Microempresa en Panamá, 2015*. 2015.

[15] R. Piper *et al.*, "Impacto económico de la crisis COVID-19 sobre la MIPYME en Panamá," 2021.

[16] L. LaBerge, C. O'Toole, J. Schneider, and Kate Smaje, "How COVID-19 has pushed companies over the technology tipping point-and transformed business forever," *McKinsey Glob. Publ.*, no. October, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: https://www.mckinsey.com/business-functions/strategy-and-corporate-finance/our-insights/how-covid-19-has-pushed-companies-over-the-technology-tipping-point-and-transformed-business-forever.

[17] V. Felch, B. Asdecker, and E. Sucky, "Maturity models in the age of industry 4.0 - Do the available models correspond to the needs of business practice?," *Proc. Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, vol. 2019-January, pp. 5165–5174, 2019, doi: 10.24251/hicss.2019.620.

[18] "Directorio Empresarial." https://www.camchi.org.pa/directorio/.

[19] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus. Horiz.*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.

[20] D. Schallmo, C. A. Williams, and L. Boardman, "Digital transformation of business models-best practice, enablers, and roadmap," *Int. J. Innov. Manag.*, vol. 21, no. 8, 2017, doi: 10.1142/S136391961740014X.

[21] S. Helduser, "Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von Morgen," *Olhydraulik und Pneum.*, no. 3, pp. 28–38, 2016.

Conceptual model to reduce non-contributory time based on Lean tools in the construction industry in Peru

Olenka Cabrera
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
Lima, Perú
u201723867@upc.edu.pe

Joselyn Tejeda
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
Lima, Perú
u201723889@upc.edu.pe

Jose Llontop
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
Lima, Perú
jose.llontop@upc.pe

Jose C. Alvarez
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
Lima, Perú
pciijalv@upc.edu.pe

Sevilay Demirkesen
Gebze Technical University
Kocaeli, Turkey
sevilay.demirkesen@gmail.com

***Abstract*— The construction sector in Peru is growing and is one of the most important, representing 19% of GDP. However, currently, in the construction industry, there is a high rate of non-contributory time, that is, the activities carried out during the construction process have a large percentage of time dedicated to activities that do not add value and lead to losses. This research attempts to reduce the high rate of non-contributory time (NCT) in building maintenance services in a Peruvian company in the construction sector. To achieve this, a conceptual model at the managerial level based on Lean tools such as Kanban, 5S, TPM was proposed.**

Keywords*— Lean tools, Non-contributory times, Construction sector, Construction industry.

I. INTRODUCTION

The construction sector is one of the most important industries in Peru due to its high impact on the economy. In the fourth quarter of 2020, it obtained a 19% GDP [1]. Besides, the industry generates a large amount of employment and is a locomotive industry for the other industries [2]. The construction projects lead to inefficient use of time, where more than 50% of time is waste to achieve weekly goals[3]. Similarly, Pons & Rubio [4] mentioned that 57% of the time, effort and materials, are invested in activities that do not add value in construction projects. For this reason, it is correct to state that the construction industry has low productivity, on which we must focus our efforts.

Construction works requires efficient management for the successful completion regardsless of their size. A project is considered successful if it is executed with respect to the planned dates, calculated budget, and full customer satisfaction [5]. Alaghbari et al. [6] mentions that the factors that lead to failures in construction projects can be categorized into three namely Human, Management, External and Technical. Among these, the most important parameters that affect productivity are the worker's experience level, the availability of materials on site, and management efficiency. As Hossain et al. [7] demonstrates, in civil works projects, 26% of the time is waste due to various activities such as waiting, movement, transportation, inventory and rework.

The main motivation of this research is to propose a conceptual model to reduce the non-contributory time (NCT) in construction works aiming to reduce late orders, loss, materials damage, and equipment stoppages. In addition, the model intends to overcome the knowledge gap existing in theory by means of complex and fragmented nature of the construction projects. The proposed model relies on a set of various tools such as Kanban, 5S and TPM.

II. LITERATURE REVIEW

Currently, the construction projects are far beyond meeting customer satisfaction with the lack of quality and cost efficiency desired by the customers [8]. The delay of the projects due to wasting time generates an increase in resources. Therefore, the underlying reasons for non-effective time usage must be researched. The non-contributory time can be explained with the following four causes: (1) Defects (37%), (2) rework (20%), (3) waiting for delivery of material (40%) and (4) unnecessary movements or periods of prolonged rest (3%) [9]. Moreover, the delays can stem from the late delivery of materials or tools, inadequate design, reworks, and equipment inefficiency [10].

In the construction industry, activities that add value represent 33%, support activities 41% and those that do not generate value 26% of the time. The activities that represent the last percentage are (1) waiting, (2) movement, (3) transportation,(4) inventory and over-processing [7]. Likewise, in an analysis of ten construction projects, it was determined that the Non-contributory time(NCT) could be equivalent to 24% of total time, the Productive time (PT) to 46% and the contributory time (CT) to 30%, where the NCT was caused due to activities like waiting, transportation, reprocessing, and displacement in the area [11].

The Lean methodology in construction projects is a technique that aims at reducing waste in construction and maximizing productivity and final customer satisfaction [12]. Regarding the lean techniques that can be implemented, according to the ranking based on the importance index, one of the techniques that would generate the greatest impact is 5S [7]. On the one hand, Goh & Goh [13] states that the Just in time (JIT) system cannot be applied absolutely correctly due to the uncertainty of the construction sector; however, it recommends a partial implementation based on E-Kanban for work management. On the other hand, according to Aslam

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00026

et.al [14] a group of recommended tools for the supply chain and materials management in construction are JIT and 5S. In relation to this, Heravi et.al [15] tells us that the application of techniques such as VSM, JIT and TPM can generate an increase in productivity and considerable performance, seeing this reflected in the company's profits. A partial implementation of the TPM, just with some pillars, can provide positive results which can be evaluated with indicators such as MTTR, MTBF, Availability and OEE [16]. It is important to emphasize that for the success of the application of Lean tools management commitment and Lean training in the project are paramount [12].

III. PROBLEM ANALYSIS METHODOLOGY

The efficiency of the productive time was determined by evaluating the yields determined by Peruvian Chamber of Construction (CAPECO) and the actual yields of the workers of the studied company.

The three times are analyzed according to their contribution to the work:
- Productive time (PT) is made up of the activities that add value to the service and for which the client is willing to pay.
- Contributory time (CT) is made up of activities that support adding value to the service.
- Non-contributory time (NCT) is made up of unnecessary activities that do not add value such as rework, leisure time, etc.

In order to ensure that the data represents the best real work, a 95% confidence interval analysis can be performed, assuming an acceptable error level of less than 5% [16]. The level of significance shows the probability of error and is usually selected between 0.01 or 0.05 [17].

Considering the above, in this case, the sample size required to obtain a 95% confidence level is 384. In this case to identify and analyze the data be carried out the next process:

1) Identify activities: First, all the activities of the process should be identified and for this step is recommended use expert judgment.

2) Classify the activities: Once all the activities were identified the next step is to classify them according to the three types of time: (1) Productive time, (2) Contributory time and (3) Non-contributory time.

3) Time taking of activities on the site: As a third step, times will be taken on the site. The necessary number of samples size will be made to obtain the desired reliability. In this case, the sample size required to obtain a 95% confidence level is 384. It is important to highlight that 384-time recordings for each activity will be made.

4) Analysis of three times (PT, CT AND NCT): Finally, an analysis of the data obtained will be carried out to identify the percentage that represents each type of time in the project.

IV. PROBLEM ANALYSIS RESULTS

To the aforementioned methodology, the results of the analysis of the classification of the PT, CT and NCT times are evidenced in a construction project for the company L2S23 to ElectroPerú S.A. Therefore, the unproductive time due to low dexterity of the workers is 318 MH.

TABLE I. UNPRODUCTIVE TIME AT PT

Unproductive time at PT- ElectroPerú S.A.	
EFFICIENCY	88%
UNPRODUCTIVE TIME (MH)	318
COST OF UNPRODUCTIVE TIME	$ 1 245

For the analysis of the contributory time (CT), expert judgment was used, in which the efficiency of activities in the category of transfer, security, services, verification and measurement was determined. Then, these were compared with the real time used in each activity. Thus, it is obtained that the unproductive time in contributory activities due to poor routes is 396 MH.

TABLE II. UNPRODUCTIVE TIME AT CT

Unproductive time at CT- ElectroPerú S.A.	
EFFICIENCY	62%
UNPRODUCTIVE TIME (MH)	396
COST OF UNPRODUCTIVE TIME	$ 1 151

Next, the NCT of the service was evaluated, concluding that it generates a loss of 1198 man-hours with a lost cost of 4 685 dollars.

TABLE III. UNPRODUCTIVE TIME AT NCT

Unproductive time at NCT- ElectroPerú S.A.	
UNPRODUCTIVE TIME (MH)	1 198
COST OF UNPRODUCTIVE TIME	$ 4 685

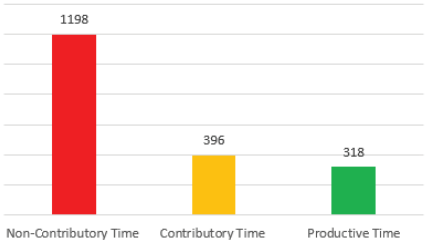
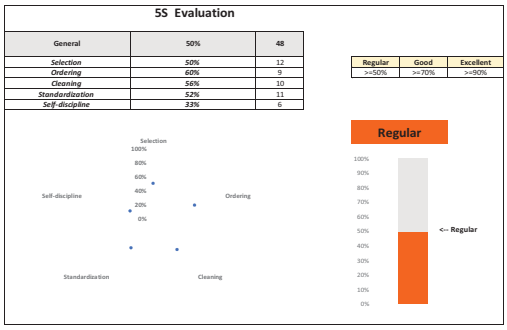


Fig. 1. Distribution of unproductive time in Construction project

On the one hand, after the analysis carried out, we can affirm that, as can be seen in Figure 1, when comparing the three times, the highest percentage of unproductive time is attributed to non-contributory time (NCT). So, it is wise to focus our efforts on this indicator. On the other hand, to determine the percentage of non-contributory time, an analysis was made of four construction works in relation to the corrective maintenance of buildings of state institutions, from which it was concluded that on average the productive time (PT) is equivalent to 38%, the contributory time 33% and the non-contributory time (NCT) 29%.

According to the study carried out, the non-contributory time stemmed from four main causes, where the most important cause was “orders generated late” with an impact of 4 584 man-hours (MH) lost, representing 28.6% of the



NCT, followed by material losses or damage with an impact of 4 303 lost MH equivalent to 26.9% of the economic impact of the problem. The causes with the least impact are the category "others" made up of work simulation, use of the cell phone during working hours, unproductive and absent travel with 482 lost MH, representing 3% of the total NCT.

To analyze the percentage of influence of the reasons in the problem, a Pareto Diagram was made with the controllable causes of the problem. Figure 2 shows that 81% of the problems will be solved by focusing on orders generated late (29.7%), loss or damage of materials and tools (23.2%) and machinery breakdown stops (27.9%).

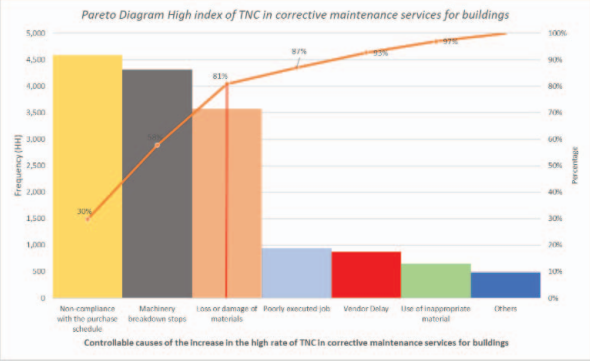


Fig. 2. Pareto Diagram

Table IV shows the current situation of the control indicators that will be used in the evaluation of the different components of the proposed model. The choice of these indicators was made taking as a reference the importance mentioned by the authors of relevant papers in each of the areas mentioned in the analysis of the causes of the problem. From this, it is evident that all the indicators are below the optimal performance of the areas.

Item	Indicator	As It	Formula
Purchasing management	Quality of generated orders [18]	48%	$\frac{Orders\ generated\ on\ time}{Total\ orders\ generated}$
Materials management	5S evaluation [19]	50%	$\frac{Actual\ score}{Ideal\ score}$
	Index of physical losses [20]	50%	$\frac{Physical\ Input\ -\ Physical\ Outputs}{Physical\ Input}$
Maintenance	OEE [21]	56%	*Availability x Performance x Quality*

TABLE IV. EVALUATION AND CONTROL INDICATORS

One of the evaluation methods is the 5S radar, using scores in each S of the methodology. Figure 3 shows that the current state of the warehouse on site is regular, complying with only 50% of the test items.

Fig. 3. 5S evaluation summary current situation

V. INNOVATIVE CONCEPTUAL MODEL

a. Base

Based on the review of the bibliography for the identification of the tools, Figure 4 presents the proposed design of the authors Horzela & Semrau [22], in which they propose the implementation of the 5S, TPM, and SMED methodology to increase the productivity of logistics and production processes in a construction company. Likewise, it highlights that the objective of the implementation of Lean is to keep the inventory to a minimum by delivering materials depending on the demand based on the Kanban and Visual management system.

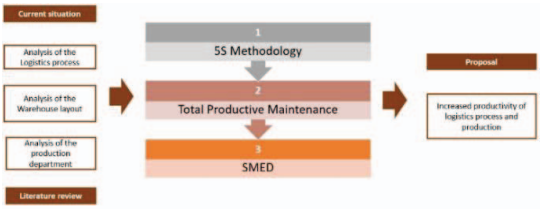


Fig. 4. Improvement Proposal model Horzela &Semrau (2021)

Another case of success in the construction sector to reduce purchases without planning is to detect errors in the verification of quality, determine the number of supplies, and prevent damage, loss, and theft of materials. The model proposed by Cayetano [23], as shown in figure 5, is based on the methodological DMAIC (Define, measure, analyze, improve, and control). which focuses on optimizing existing processes. In addition, he uses the Kanban tools, ABC Classification for the improvement of the purchasing process, and the 5S methodology for the standardization of his processes. The results of the proposed solution show an improvement in productivity by 281%, a decrease of 25% in working hours, and 93% less in costs due to the waste.

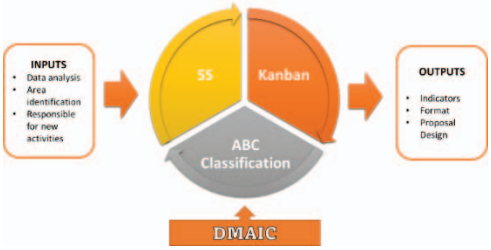
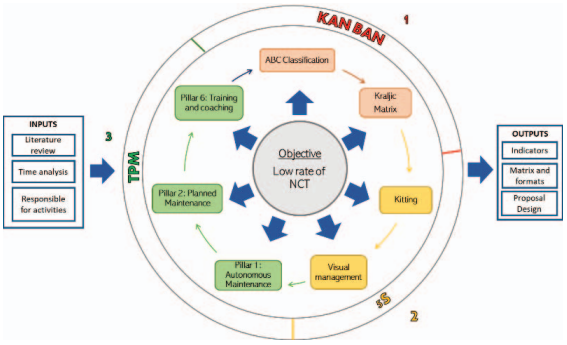


Fig. 5. Improvement proposal model Cayetano(2018)

a. Proposed model

Considering the given background, it is obvious that the industry needs an effective model to implement projects to

successfully manage projects. As being one of the most important burden items, reducing NCT is critical for the success of projects. In this respect, this study proposes a comprehensive solution model, which might be implemented by the companies in the construction industry to either experience less or no waste. This solution model was proposed as a result of a case study with a construction company in Peru. The high rate of NCT was identified as the main problem of the company. From the research conducted,



it is known that different articles seek to reduce non-contributory time through different tools; however, the applications of these solution proposals in SMEs(Small to Medium Enterprises) are not viable. Therefore, the originality of the solution proposed is based on the viability of its application in SMEs and the joint work of three Lean tools in the construction sector. The innovative proposal model focuses on 3 fields of action, purchasing management, materials management, and maintenance. Likewise, it has 3 components Kanban, 5S, and TPM.

Fig. 6. Model of the proposed solution

A. *Kanban*

The inactivity due to orders generated late is due to poor communication between the construction site resident, the warehouse, and the purchasing area. This cause is equivalent to 28.6% of the non-contributory time and with the use of the Kanban tool it is expected to reduce the TNC by implementing the following steps.

1. Identification of principal materials: To identify correct strategies for each material, the use of the Kraljic matrix is proposed. Its elaboration begins with the ABC classification, to determine which are key materials according to consumption. In addition, information was collected on the complexity of supply by material. With all the previous data, the Kralic matrix is generated to categorize the materials in leveraging, strategic, routine, and bottleneck

2. Application of the Kanban: Currently, the company has the master construction plan and the breakdown of the requirements according to activities. From this, the duration of the activity and the list of materials are extracted. This information is necessary for the implementation of Kanban, which starts with the purchasing manager calculating the purchasing management time for each material. It should be noted that in the case of leverage materials, not only the Lead Time will be considered, but also a re-quote period of two days on average, due to the strategy in these materials is to look for better offers. Next, the construction resident updates the progress of the work daily, with which the remaining days to finish the work are calculated. These days are compared with the purchasing management time for the materials needed for the next activity. With the above, the Kanban cards will be completed with colored traffic lights according to the flow of the order.

- Red Kanban card will be used when the remaining days of the activity are less than the material purchase management time.
- Yellow Kanban Card will be applied when the remaining days of the activity are equal to the purchasing management time of the required material.
- Green Kanban card, to be used when the remaining days of the activity are greater than the required material purchase management time. To avoid crowding on the board, this card will only be used if the difference in days is one or two days, in case of more days do not place the card on the Kanban board

	KANBAN CARD		
Draft			
Exercise		Post Activity	
Material			
Balances (Stocks)		Quantity	
Supplier		Lead time	
Requested by			

Fig. 7. Red kanban card

The storekeeper will complete the box of balances or stocks. Finally, place the cards on the e-Kanban board, classifying them into three sections. The first section “to order” oversees the resident on-site, who by this means requests material orders from the purchasing area. The “order” and “reception on-site” sections oversee the purchasing manager.

B. *Metodologia 5S*

The loss or damage of materials is equivalent to 26.9%, so the warehouse does not have the necessary conditions for the care of tools and materials. To reduce it, the 5S methodology is implemented, which begins with a preliminary stage in which we evaluate the current situation, obtaining a general score of 50% in the 5S evaluation, concluding that the condition of the warehouse is regular. After that, we elaborated the work plan and assign those responsible to the 5S committee.

1) Seiri (organize): Start the categorization of materials and tools, placing red (unnecessary objects) and green cards (necessary). The red card items will be sold, donated, returned, discarded, or repaired.

2) Seiton (order): At this stage, you start by selecting a strategic area, to relocate the orange and green card items. Following this, we start with the implementation of kitting, first, we identify the elements for the kits according to the activities to be carried out. With this, the warehouse is ordered considering the necessary quantity of materials per task, for an assembly of simple kits throughout the work. Finally, at this stage, the floor is marked with tape following a 5S color pattern.

3) Seiso (clean): Develop a tentative schedule and cleaning routine format evidencing the cleaning objective for each item.

4) Seiketsu (Standard): First, the activities to standardize were defined to evaluate their compliance throughout the project. Next, procedures are developed that help all employees know what the steps are for the execution of that task, mitigating errors in the implementation of the methodology. In addition, visual controls are implemented such as tool profiles, usage cards, and images of the ideal condition of the work area.

5) *Shitsuke (audit):* Carry out the 5S evaluation after implementing the proposal and the training schedule. To determine that the implementation of this tool was successful, the evaluation score must be >= 70% classified as "Good" or >= 90% "Excellent".

C. TPM

The low availability of equipment is equivalent to 22.3% of the non-contributory time, with the main cause being shutdowns due to breakdowns, for which it is proposed to implement three pillars of Total Productive Management (TPM), autonomous maintenance, planned maintenance and Training. The process starts with a preliminary stage modal analysis of effects and failures and then proceeds to implementation of the pillars.

1) Autonomous maintenance: Once the control points have been identified, the frequency with which each of the activities carried out is determined. To keep track of this process, a quarterly validation is carried out, in which the progress and compliance of each of the maintenance activities are scored from 1 to 5. 1 will correspond to poor progress and 5 to perfect compliance with autonomous maintenance by the operators. As a result, a percentage is obtained, which indicates the level at which the process is fulfilled, equivalent to an optimum level, a percentage between 80 to 100% and low between 0 and 49%. In autonomous maintenance, it is reinforced by the implementation of OPL, which is placed in the space designated for the storage of light equipment. These lessons generate the basic knowledge to perform autonomous maintenance effectively.

2) Planned maintenance: Once the faults have been identified and determined in the action plan, it's necessary to elaborate a preventive maintenance schedule in which the frequency, date of the last maintenance and the scheduled date of maintenance is observed.

3) Education and training: The training phase begins with an evaluation before the training, to measure the current knowledge of the operators, as well as weekly progress. The matrix evaluates the level of knowledge they have regarding topics such as the 5s and TPM methodologies, roles and responsibilities, the meaning of the color cards, information board and operational knowledge. Likewise, an evaluation about e to know the level of workers. As a second step, a semester training schedule and at the end of the month, the operators are evaluated, and their progress is compared with the results of the preliminary matrix.

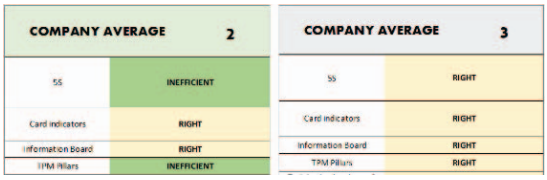


Fig. 8. Skills Knowledge Matrix Initial and Final Result Cards

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The importance of the development of the model lies in the great economic impact of the construction sector and despite this, it has low productivity due to the number of hours of non-contributory time. This article seeks to reduce the NCT in the corrective maintenance of buildings through a conceptual model with a combination of three Lean tools such as Kanban, 5S and TPM. The originality of the proposed model is based on the combination of multiple lean tools and the feasibility of its application in SMEs (Small and Medium Enterprises). Consequently, the model is intended to increase the number of purchase orders generated on time, increase the availability of equipment, and decrease downtime due to lost or damaged materials. Finally, it is expected to apply the proposed model to a construction company in Peru. For future works, we recommend investigating the application of the JIT system in the construction sector since the Kanban is a kind start for the development of this philosophy. Similarly, we suggest implementing Total Productive Management (TPM) on a larger scale and adding the remaining pillars to the solution proposed to generate a high impact on equipment availability. Also, it's important to emphasize that one limitation of this study was that NCT is generated also per external factors that we can't control because it depends on the contractor company and for this reason, we suggest this in the future investigate this topic.

REFERENCES

[1] INEI, "PRODUCTO BRUTO INTERNO TRIMESTRAL ," 2020. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/01-informe-tecnico-pbi-iv-trim-2020.pdf (accessed Apr. 21, 2021).

[2] B. León Castañeda, E. Huanachin Cordova, V. Torres Díaz, and J. Reyes Ñique, "Reduction of non-contributory work of personnel using UAV methodology (Phantom 4 Pro RTK) and conventional Topography with Total Station (Leica TS 06), in road projects," 2020.

[3] J. F. Pons and I. Rubio, *Lean construction y la planificación colaborativa metodología del last planner system*. 2019. Accessed: Oct. 02, 2021. [Online]. Available: https://www.cgate.es/pdf/LEAN CONSTRUCTION PDF Web.pdf

[4] J. F. Pons and I. Rubio, *LEAN CONSTRUCTION 10 CLAVES DEL ÉXITO PARA SU IMPLANTACIÓN*, 1.ª edición. Gráficas Hispania Valladolid, S.L, 2021. Accessed: Oct. 02, 2021. [Online]. Available: https://www.cgate.es/pdf/LEAN CONSTRUCTION II.pdf

[5] C. Sebastian and G. Diaz, "APLICACIÓN DEL MODELO SCOR A PEQUEÑAS EMPRESAS CONSTRUCTORAS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE ABASTECIMIENTO Y POSIBLES PROPUESTAS DE MEJORA," 2019. Accessed: Apr. 10, 2021. [Online]. Available: https://core.ac.uk/reader/286063630

[6] W. Alaghbari, A. A. Al-Sakkaf, and B. Sultan, "Factors affecting construction labour productivity in Yemen," *https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1382091*, vol. 19, no. 1, pp. 79–91, Jan. 2017, doi: 10.1080/15623599.2017.1382091.

[7] M. A. Hossain, A. Bissenova, and J. R. Kim, "Investigation of Wasteful Activities Using Lean Methodology: In Perspective of

Kazakhstan's Construction Industry," *Build. 2019, Vol. 9, Page 113*, vol. 9, no. 5, p. 113, May 2019, doi: 10.3390/BUILDINGS9050113.

[8] M. S. Bajjou and A. Chafi, "Towards implementing lean construction in the Moroccan construction industry: Survey study," *Proc. 2018 Int. Conf. Optim. Appl. ICOA 2018*, pp. 1–5, May 2018, doi: 10.1109/ICOA.2018.8370556.

[9] F. Ariyanti, C. Annatania, and D. A. Ningtyas, "Implementation of lean construction and critical chain project management (CCPM) for waste management and work estimation on the Ciawi dam construction project," 2020, doi: 10.1088/1755-1315/794/1/012074.

[10] F. Innella, M. Arashpour, and Y. Bai, "Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 145, no. 12, p. 04019076, Sep. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001712.

[11] P. Angarita Uscategui, R. Gallardo Amaya, and N. Afanador Garciá, "Analysis of the time variable in on-site concrete production," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1708, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1708/1/012002.

[12] S. Demirkesen and H. Gokberk Bayhan, "Critical Success Factors of Lean Implementation in the Construction Industry," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. PP, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1109/TEM.2019.2945018.

[13] M. Goh and Y. M. Goh, "Lean production theory-based simulation of modular construction processes," *Autom. Constr.*, vol. 101, pp. 227–244, May 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.12.017.

[14] M. Aslam, Z. Gao, and G. Smith, "Exploring factors for implementing lean construction for rapid initial successes in construction," *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 123295, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123295.

[15] G. Heravi, M. F. Kebria, and M. Rostami, "Integrating the production and the erection processes of pre-fabricated steel frames in building projects using phased lean management," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 28, no. 1, pp. 174–195, Feb. 2019, doi: 10.1108/ECAM-03-2019-0133.

[16] R. K. Saran and S. Yadav, "Operations Management and Systems Engineering," pp. 241–249, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-6476-1.

[17] K. Fang and M. Yang, *A Practical Approach to Model Validation*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-813543-3.00007-X.

[18] V. J. Martinez, B. J. DE-LA-HOZ, G. J. GARCÍA, and I. MOLINA, "Gestión logística en pymes del sector de operadores de carga del Departamento del Atlántico," *Rev. Espac.*, vol. 38, no. 58, Dec. 2017, Accessed: Nov. 28, 2021. [Online]. Available: http://www.revistaespacios.com/a17v38n58/17385813.html

[19] M. Jiménez, L. Romero, J. Fernández, M. del M. Espinosa, and M. Domínguez, "Extension of the Lean 5S methodology to 6S with an additional layer to ensure occupational safety and health levels," *Sustain.*, vol. 11, no. 14, 2019, doi: 10.3390/su11143827.

[20] J. Zhao, Y. Zheng, O. Seppänen, M. Tetik, and A. Peltokorpi, "Using Real-Time Tracking of Materials and Labor for Kit-Based Logistics Management in Construction," *Front. Built Environ.*, vol. 7, Sep. 2021, doi: 10.3389/FBUIL.2021.713976/FULL.

[21] U. Mahraj, S. Golam, and M. Mohammad, "Enhancing OEE as a Key Metric of TPM Approach-A Practical Analysis in Garments Industries," *Eur. J. Eng. Technol. Res.*, pp. 5–6, 2021, Accessed: Nov. 21, 2021. [Online]. Available: https://www.ejers.org/index.php/ejers/article/view/2376/1055

[22] J. Semrau and A. Horzela, "Using Tools to Improve Logistics and Production Processes in a Selected Construction Company Development strategy as an innovative tool for managing an organization View project Research on corporate social responsibility (CSR) in the context of cluster activities. View project Using Tools to Improve Logistics and Production Processes in a Selected Construction Company," *Eur. Res. Stud. J.*, vol. XXIV, no. 1, pp. 1211–1232, 2021, doi: 10.35808/ersj/2100.

[23] O. Cayetano, "Propuesta de mejora del proceso logístico de una empresa constructora," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2018. doi: 10.19083/tesis/624562.

Experimental study of angle-type shear connectors welded to steel beams and embedded in reinforced concrete slabs

Estudio experimental de conectores de corte tipo ángulo soldados a vigas de acero y embebidos en losas de hormigón armado

Marcelo Fernado Castañeda Vilatuña
Escuela Politécnica Nacional, FICA
Quito, Ecuador
marcelo.castaneda@epn.edu.ec

Brayan Alejandro Vera Vélez
Escuela Politécnica Nacional, FICA
Quito, Ecuador
brayan.vera@epn.edu.ec

Luis Tinerfe Hernández Rodríguez
Escuela Politécnica Nacional, FICA
Quito, Ecuador
luis.hernandezr@epn.edu.ec

Diego Armando Arevalo Chafuel
Escuela Politécnica Nacional, FICA
Quito, Ecuador
diegoarev7@hotmail.com

Gabriel Edmundo Velastegui Balda
Escuela Politécnica Nacional,
Laboratorio de soldadura
Quito, Ecuador
gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Edwin Eduardo Guaminga Pillajo
Escuela Politécnica Nacional, FICA
Quito, Ecuador
edwin.guaminga@epn.edu.ec

***Abstract*—**As is well known, the main function of the use of connectors is to transmit shear forces from the steel beam to the concrete slab and vice versa, in addition to providing a tie between these structural elements. In this project, the strength of angle type shear connectors welded to the beam top flange in 90 and 45-degree position is analyzed. Six push out test with cyclic loading and two with monotonic loading were carried out, and the load against slip curves were evaluated to find the shear strength, slip, ductility, stiffness and dissipated energy. It was obtained that the angle connectors in 90 degree position support a lower load, but they have a higher ductility with respect to the connectors located in 45 degree position. Therefore, they develop a higher energy dissipation. In both cases the stiffness decreases as the slip increases.

Keywords— Shear resistance, Shear connector, Angle connector, Push out test

***Resumen* —** Como es bien conocido la principal función del uso de conectores es el de transmitir los esfuerzos de corte de la viga de acero a la losa de hormigón y viceversa, además de proporcionar un lazo de unión entre estos elementos estructurales. En este proyecto se analiza la resistencia de los conectores de corte tipo ángulo soldados al patín de la viga en posición 90 y 45 grados. Se llevaron a cabo 6 ensayos de corte directo con carga cíclica y 2 con carga monotónica, y se evaluaron las curvas de carga contra deslizamiento para encontrar la resistencia a corte, el deslizamiento, la ductilidad, rigidez y energía disipada. Se obtuvo que los conectores tipo ángulo en posición 90 grados soportan una menor carga, pero tienen una mayor ductilidad con respecto a los conectores ubicados en posición 45 grados, por lo tanto, disipan una mayor energía. En ambos casos la rigidez disminuye conforme aumenta el deslizamiento.

Palabras claves — Resistencia a corte, Conectores de corte, Conector tipo ángulo, Ensayo push out

I. INTRODUCCIÓN

La construcción y ensamble de losas de hormigón con conectores de corte se ha usado mucho en los últimos años. Los conectores tipo stud presenta algunas limitaciones importantes en cuanto a problemas de fatiga y también a la necesidad de un equipo especial de soldadura [1]. Por lo que esta investigación busca un nuevo tipo de conector que pueda adaptarse tanto en rendimiento como instalación. Una alternativa presentada en este estudio es el uso de conectores de corte elaborados con un perfil de acero tipo ángulo, que reemplazan a los pernos tipo stud.

El comportamiento de los conectores de corte tipo ángulo depende de factores específicos por lo que investigadores de este campo cambian distintas variables como la forma y las propiedades de los materiales de construcción, así como el hormigón y el acero, para obtener resultados acerca del comportamiento de estos conectores en la construcción.

Autores como Choi [2] realizaron pruebas de fatiga y análisis de esfuerzos para aclarar la resistencia de la unión soldada entre el conector de corte tipo ángulo y la placa inferior, evidenciándose grietas en el acero del conector que se extendían en dirección del espesor, estas grietas fueron causadas por la concentración de esfuerzos debido a la deformación local por flexión, lo que confirma que el nivel de esfuerzos en la unión soldada era bajo y menos del límite de fatiga.

En otra investigación realizada por A. Shariati [3] en la que se analizó el comportamiento de conectores angulares a corte embebidos en losa de hormigón de alta resistencia,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00027

ensayándose ocho muestras sobre varias geometrías, variando la longitud y la altura de los conectores, bajo cargas monotónicas y cargas cíclicas de fatiga. Hallaron que todos los especímenes fallaron con la fractura angular, tanto en cargas estáticas como cíclicas. Se produjo una pequeña disipación de energía por fatiga y las losas de hormigón evidenciaron más grietas con ángulos más largos y una mayor ductilidad con ángulos de mayor altura.

Bezerra [4] realizó ensayos de corte directo y simulaciones computacionales para analizar el comportamiento en conectores tipo V fabricados a partir de barras de perfil de acero en U, y los comparó con resultados obtenidos de conectores tipo perno. Encontró que las fuerzas de corte se distribuyen más uniformemente en los conectores tipo V y en las losas de hormigón. La concentración de esfuerzos en el conector tipo perno indicaron una mayor deformación en comparación con los conectores en V, lo que significa un fuerte agrietamiento del hormigón en la superficie interna de las losas de hormigón.

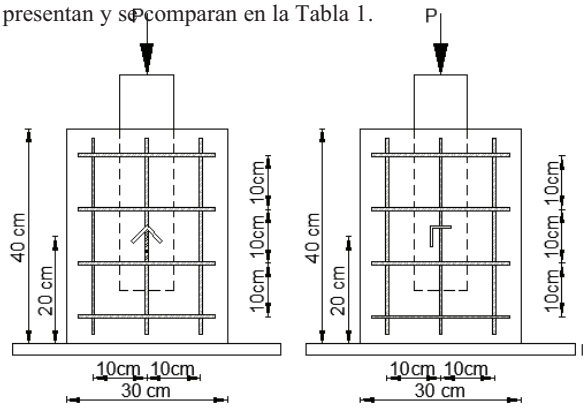
El tipo de conector usado en la presente investigación es el conector tipo angular formado a partir de pedazos de perfiles ángulos de acero de 40x40x6 mm y soldado al patín de la viga en forma de L (90º) y V (45º) como se muestra en la Figura 1. La altura del conector será de 8 cm y la longitud (Lc) del mismo para la utilización de las ecuaciones de diseño será la distancia perpendicular a la fuerza de corte, que se presenta en la Figura 2. Se ensayan estos conectores mediante el ensayo de corte directo que consiste en una viga de sección "I" en la que en los patines se conectan a dos pequeñas losas de hormigón. Las losas se colocan en la placa inferior de una máquina o marco de prueba de compresión, y una carga vertical (P) se aplica al extremo superior de la sección de la viga de acero, lo que permite que los conectores reciban directamente los esfuerzos de corte. [5]

Los datos que se recogen de este ensayo son la carga máxima, los deslizamientos relativos entre la viga y las losas de hormigón. Los resultados que se obtienen del análisis de la curva de carga-deslizamiento se utilizan para determinar la rigidez, ductilidad y energía disipada del sistema.

También se compara la resistencia nominal obtenida de ecuaciones presentes en códigos internacionales y también de investigaciones realizadas por diferentes autores.

Con respecto a las ecuaciones de diseño, se realiza una comparación entre los resultados de la carga máxima que alcanzaron los conectores de corte en los ensayos.

Varios ensayos se han realizado con el fin de determinar el comportamiento de este tipo de conectores tipo ángulo, Franco & Martínez [6] realizaron un ensayo con similar posición de los ángulos, pero variaron el espesor de los mismos a 4 mm. Y Ayala & Chicaiza [7] variaron la posición del conector de 6mm de espesor en dos tipologías, las que se muestran en la Figura 3. Los resultados de estos ensayos se presentan y se comparan en la Tabla 1.



Orientación 45º (V) Orientación 90º (L)

Figura 1. Ubicación de los conectores

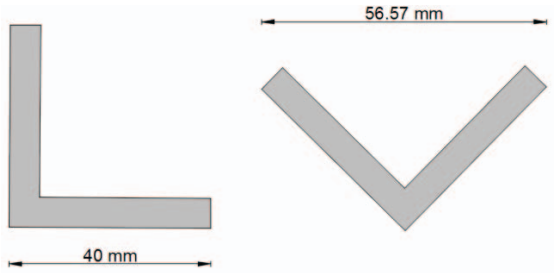


Figura 2. Valor de Lc para el conector a 90° (L) y 45° (V)

Tabla 1. Resultados obtenidos en estudios previos

Franco & Martínez [6] Orientación/espesor	f'_c **(MPa)**	E_c **(GPa)**	F_{ut} **(MPa)**	P_u **(kN)**	δ_u **(mm)**	**Factor de ductilidad**	**Rigidez (kN/mm)**	**Energía Disipada (kN·mm)**
45°/4 mm	26,53	21,16	339,33	143,20	13,11	2,85	73,52	1837,73
90°/4 mm				142,04	16,50	3,14	80,59	2071,54
Ayala & Chicaiza [7] Orientación/espesor	f'_c **(MPa)**	E_c **(GPa)**	F_{ut} **(MPa)**	P_u **(kN)**	δ_u **(mm)**	**Factor de ductilidad**	**Rigidez (kN/mm)**	**Energía Disipada (kN·mm)**
Tipo 1/6 mm	38,80	27,13	453,87	45,74	9,15	1,66	10,43	313,33
Tipo 2/6 mm				58,30	9,01	2,05	8,93	355,02

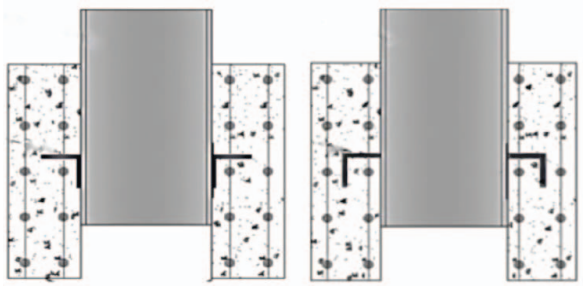


Figura 3. Tipología 1 (izq.) y tipología 2 (der.)

APLICACIÓN DEL MARCO TEÓRICO

Se analizarán tres ecuaciones de diseño de normas internacionales y tres ecuaciones estudiadas por varios autores con estudios guiados a conectores angulares. Debido a que las normas y códigos actuales no cuentan con ecuaciones de diseño para conectores tipo ángulo, se usarán ecuaciones aplicadas a otros tipos de conectores como tipo canal y tipo perno con el objetivo de ver si se pueden adaptar al ángulo.

La primera ecuación (1) que se utiliza para predecir la carga última de los conectores es la ecuación presente en el AISC 360 [8] para conectores tipo canal es:

$$Q_n = 0.3 \cdot \left(t_f + 0.5 \cdot t_w\right) \cdot L_c \cdot \sqrt{Ec \cdot f'_c} \qquad (1)$$

Donde, f'_c y Ec son la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón respectivamente (MPa), L_c es la longitud del conector de corte (mm), t_w es el espesor del alma del conector (mm), t_f es el espesor del patín del conector tipo canal (mm), se asume que la malla electrosoldada con diámetro de las barras 5,5 mm soldada en la parte superior de la altura del ángulo, desempeña la misma función de anclaje por lo que se emplea este diámetro.

En el Eurocódigo 4 [9] se presentan ecuaciones de diseño para conectores tipo perno. Para el cálculo de la resistencia de diseño a corte de los conectores se adopta como el menor de dos valores que se obtienen de las ecuaciones (2) y (3).

$$P_{RD1} = 0.8 \cdot f_u \cdot (\pi \cdot d^2/4)/\gamma_v \qquad (2)$$

$$P_{RD2} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot (f_{ck} \cdot E_{cm})^{0.5}/\gamma_v \qquad (3)$$

Donde, f_u es la resistencia a la tracción del acero del conector (MPa), f_{ck} y E_{cm} son la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón respectivamente (MPa). En el caso de la ecuación (2) se reemplaza $\pi d^2/4$ por el área transversal del conector tipo ángulo usado en esta investigación la cuál es $A_{ac} = 444$ mm^2. Y para el caso de la ecuación (3) se reemplaza el diámetro del perno d por ϕ_c= 24 mm que se calcula igualando el área transversal del conector de corte tipo perno al área transversal del conector angular. El valor de α es un factor y γ_v=1.25 según lo que establece el Eurocódigo [9].

El código estándar canadiense [10] establece la siguiente ecuación para el análisis de conectores de corte tipo canal:

$$Q_r = 45 \cdot (t + 0.5 \cdot w) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c} \qquad (4)$$

Donde, f'_c es la resistencia a compresión del hormigón (MPa), L_c es la longitud del conector de corte (mm), el valor de t (mm) se analiza de la misma manera siendo este el espesor de la malla electrosoldada soldada en la parte superior del ángulo, w es el espesor del alma del conector (mm).

En la investigación realizada por Bezerra [4] para conectores de corte tipo canal cortados tipo V. La ecuación que acompaña este estudio es:

$$Q_{vc} = 0.6 \cdot A_{vc} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_{cm}} \qquad (5)$$

Donde, f'_c y E_{cm} son la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón respectivamente (MPa), A_{vc} es el área transversal del conector (mm^2).

Soty & Shima [11] en su estudio acerca de conectores de corte tipo ángulo y canal propone usar la siguiente ecuación.

$$V_u = k \cdot \sqrt{f_c} \cdot L_c \cdot h \qquad (6)$$

Donde, f_c es la resistencia a compresión del hormigón (MPa), L_c es la longitud del conector de corte (mm), h es la altura del conector de corte embebida en la losa de hormigón (mm), k es un factor que relaciona el espesor y la altura del conector.

La siguiente ecuación se toma de la investigación realizada por Balasubramanian & Rajam [12], los autores utilizan una ecuación de estudios franceses basadas en ecuaciones del Eurocódigo [9].

$$Q_{ud} = 10 \cdot L_c \cdot hac^{3/4} \cdot f_c^{2/3}/1.25 \qquad (7)$$

Donde, f_c es la resistencia a compresión del hormigón (MPa), L_c es la longitud del conector de corte (mm), hac es la altura embebida en la losa de hormigón (mm).

II. MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS

El hormigón a usarse en este proyecto se previó con una resistencia a compresión característica de 28MPa a los 28 días. De acuerdo con el ACI-318 [13] se realizaron ensayos de compresión de cilindros de hormigón a las edades de 7, 14 y 28 días para encontrar la resistencia real a compresión del hormigón y también a los 56 días para encontrar el módulo de elasticidad, siguiendo los requerimientos de la norma ASTM C469M [14].

Los cilindros de hormigón se fabricaron de acuerdo con la normativa ASTM C31M [15] con dimensiones de 100 x 200 mm y se ensayaron bajo la norma ASTM C39M [16]

Los resultados de los ensayos arrojaron un valor promedio de resistencia a compresión del hormigón f'_c=28,70 MPa y un módulo de elasticidad de E_c=22,77 GPa. Para realizar los ensayos de corte directo se esperó a que el hormigón alcance la resistencia a los 28 días de edad

Se realizaron ensayos a tracción de probetas de acero, provenientes del conector de corte usado en la presente investigación, para verificar su esfuerzo a tracción, esfuerzo de fluencia y módulo de elasticidad. Las dimensiones de la probeta siguen los requerimientos de la norma ASTM E8 [17]

El ensayo a tracción de las probetas metálicas muestra un esfuerzo a tracción F_{ut}=478,33 MPa, un esfuerzo de fluencia F_y=326,89 MPa y un módulo de elasticidad E=181,77 GPa

Se construyeron ocho especímenes, de acuerdo a las especificaciones del Eurocódigo 4 [9] Primero se elabora el encofrado de acuerdo a las dimensiones de las losas presentadas en la Figura 1, luego se sueldan el conector al patín de la viga y la malla electrosoldada al ángulo mostrada en Figura 4. La malla es de 5,5 mm de diámetro espaciada a 100 mm. Después se funden las losas en una superficie horizontal plana. Aproximadamente a la tercera semana después de haber fundido las losas se desencofran y se procede al ensamble de las partes que conforman la viga de acero mediante soldadura, las dimensiones de la viga se presentan en la Figura 5. Adicionalmente se soldó una platina de 100 mm en el alma de la viga de acero, al nivel de los conectores para posteriormente colocar en esa posición un Transductor diferencial de variación lineal (LVDT). Este detalle y la configuración del ensayo se presenta en la Figura 6.

La soldadura del ángulo al patín de la viga y las placas de acero para formar la viga tipo I se llevó a cabo bajo normativa AWS D1.1 [18]. Concretamente el tipo de soldadura utilizada en este proyecto y detallada por dicha norma es la soldadura en ranuras de junta de penetración completa (CJP) para conexiones no tubulares y soldadura en filete.

Por otro lado, el proceso de soldadura empleado es el que identifica la AWS como Gas Metal Arc Welding, (GMAW), donde se establece un arco eléctrico entre un alambre de cobre que es alimentado continuamente y la pieza a soldar. La protección del arco se efectúa a través de un gas (O_2)

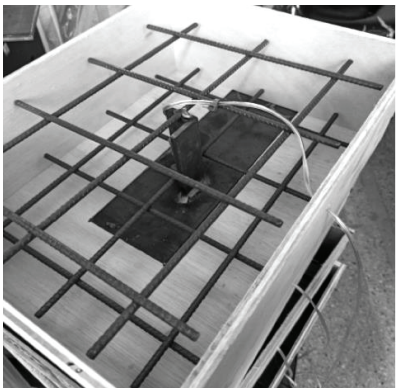


Figura 4. Construcción del encofrado.

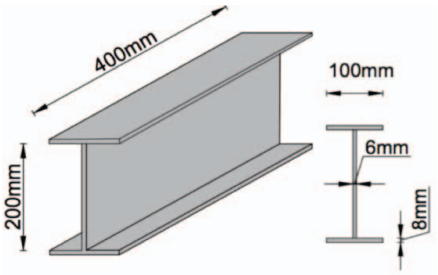


Figura 5. Dimensiones de la viga tipo I

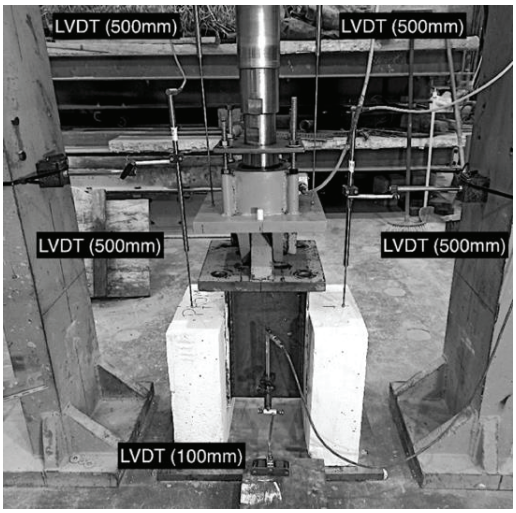


Figura 6. Equipos y Configuración del ensayo

Para el desarrollo del ensayo de corte directo (*Push-Out*) primero se obtiene la carga máxima esperada del ensayo monotónico por cada ubicación del conector. Una vez obtenida esta carga para los ensayos con carga cíclica se varía la carga entre el 5% y el 40% de la misma durante 25 ciclos y en un último ciclo, el 26, se carga la probeta y de acuerdo con el Eurocódigo 4 [9] de tal manera que la falla no ocurra en menos de 15 minutos.

III. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Para el procesamiento de los datos y obtención de las curvas carga-deslizamiento que se presentan en esta sección, se toma en cuenta la carga vertical aplicada dividida para 2, debido a que hay una losa con su conector a cada lado, y los deslizamientos relativos entre la viga de acero tipo I y las losas de hormigón armado.

El modo de falla presente en todas las probetas fue la fractura del conector de corte de espesor 6mm mostrado en la Figura 7. Se podrían considerar tres etapas durante el ensayo de las probetas para evidenciar mejor la evolución del fallo: en la carga cíclica, antes de la carga máxima y después de la carga máxima.

En la carga cíclica: la carga varía entre el 5% y el 40% de la carga máxima durante 25 ciclos, pero no hubo presencia de fisuras en el hormigón en las dos ubicaciones de los conectores (90° y 45°).

Figura 7. Mecanismo de falla

Antes de la carga máxima: para ambas ubicaciones del conector se presentan pequeñas fisuras cercanas al conector de corte que se extienden en dirección de 45° .

Después de la carga máxima: las grietas en el hormigón son más anchas y largas a medida que aumentan los deslizamientos del sistema que justo antes de la fractura del conector grandes grietas son evidentes en las caras laterales de las losas como se ve en la Figura 8 y también un pequeño desprendimiento del hormigón por debajo del conector de corte debido a que el hormigón se encuentra confinado en esta zona, lo que se observa en la Figura 9.

Cabe destacar que los conectores no se fracturaron sino hasta después de que el sistema alcanzara la carga máxima, por lo cual para observar el desarrollo de la falla se cargó el sistema hasta la fractura de los mismos, evidenciado en la Figura 10.

Las siguientes figuras representan el comportamiento carga-deslizamiento de los conectores de corte. La Figura 11 refiere bajo carga monotónica, mientras que las Figuras 12 y 13 representan el comportamiento sometido a carga cíclica de los conectores a 45° y 90° respectivamente.

Se presenta también una curva de histéresis en la Figura 14 que representa el comportamiento de los conectores ubicados a 45° y 90° durante los ciclos de carga, se puede diferenciar que tienen una pequeña curva al llegar al 40% de la carga máxima. Esto se debe a que hubo presencia de que el material plastificó durante los ciclos, también se diferencia medida que los ciclos aumentan los deslizamientos también lo hacen.

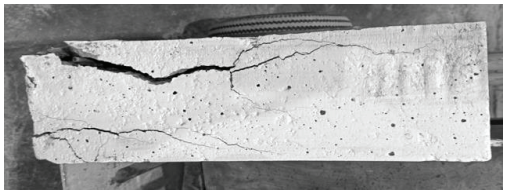


Figura 8. Agrietamiento en la base y cara lateral

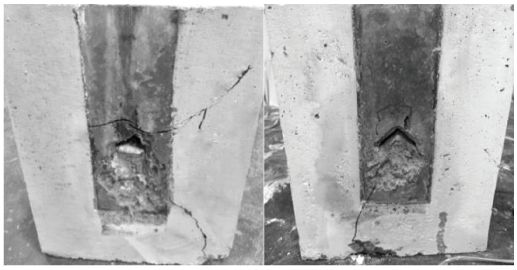


Figura 9. Agrietamiento en las losas

Figura 10. Fractura del conector de corte

La resistencia característica a corte P_{Rk} y deslizamiento característico δ_{Rk} se calcula de acuerdo al Eurocódigo 4 [9], con el valor mínimo de P_u y δ_u de los datos obtenidos del ensayo de las tres probetas similares y reducidas en un 10%.

La resistencia característica obtenida tiene un valor de 170,47 kN para conectores a 45° y 120,52 kN para conectores a 90°. El deslizamiento característico tiene un valor de 7,54 mm para conectores a 45° y 10,53 mm para conectores a 90°.

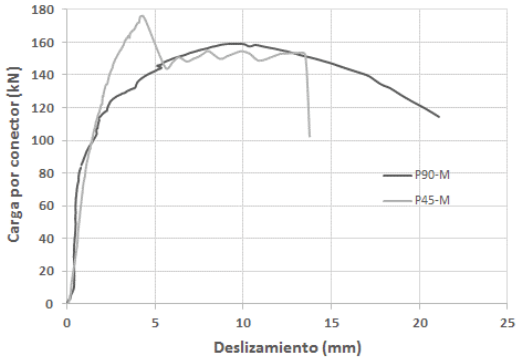


Figura 11. Carga-deslizamiento en ensayo monotónico

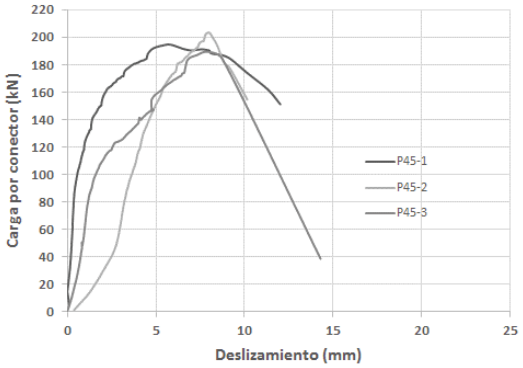


Figura 12. Carga-deslizamiento en conectores a 45°

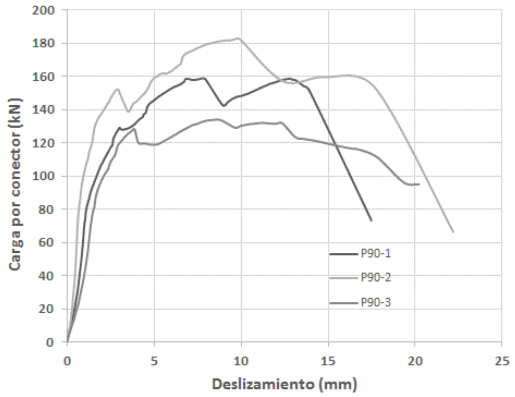


Figura 13. Carga-deslizamiento en conectores a 90°

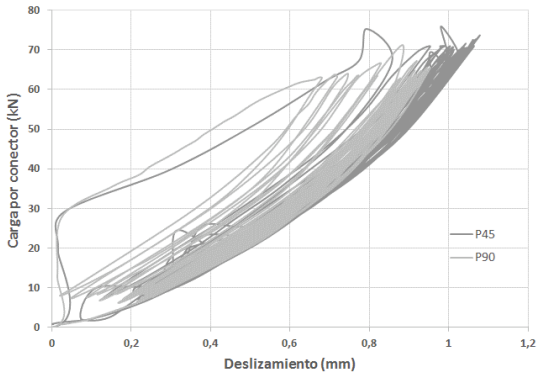


Figura 14. Curva de histéresis

El desplazamiento relativo de los conectores de corte y la losa de hormigón determina el cambio de la rigidez del sistema, y para reflejar este cambio en la rigidez se analiza la variación de la misma bajo cargas de cíclicas y monotónicas. [19]

La rigidez de las probetas se calcula de acuerdo con la ecuación (8):

$$K_i = P_i/\Delta_i \quad (8)$$

Donde, K_i es la rigidez a corte de cada espécimen (kN/mm), P_i es el valor de carga (kN), Δ_i es el deslizamiento en determinado valor de la carga (mm)

La rigidez que se presenta al inicio de la prueba con carga monotónica es grande y decrece a medida que aumenta el desplazamiento, y en el último ciclo de la carga de fatiga las gráficas muestran una rigidez con una pendiente pronunciada y a medida que aumenta el desplazamiento llega a un punto máximo para después disminuir reflejado en la Figura 15.

Si no se tiene en cuenta la deformación del conector de corte por un método más exacto, según el Eurocódigo 4 [9], se debe calcular el valor de la rigidez característica a corte de este (K_{Rk}) por la influencia del deslizamiento usando la ecuación (9) y los resultados se muestran en la Tabla 2

$$K_{Rk} = 0.7 \cdot P_{Rk}/S \quad (9)$$

Donde, P_{Rk} es la resistencia característica (kN), S es el deslizamiento (mm) determinado a partir del ensayo de corte directo y corresponde a un valor de carga igual a $0{,}7 \cdot P_{Rk}$.

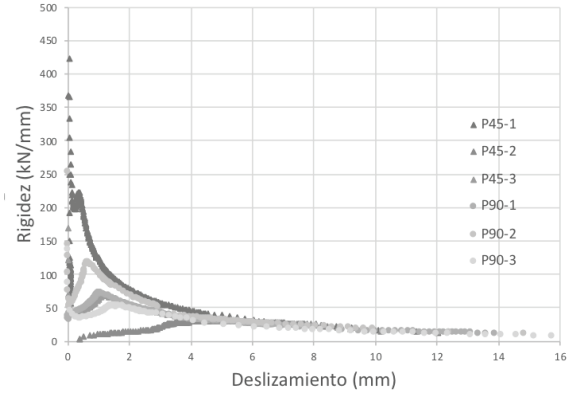


Figura 15. Variación de la rigidez bajo cargas cíclicas

La ductilidad es una medida de seguridad de un elemento o sistema que brinda prevención ante un fallo inminente del mismo debido a la fatiga producto de cargas externas. [20]

Kim [21] explica el factor de ductilidad de deslizamiento μ como el cociente de dos valores $\Delta_{máx}$ (mm) que es el desplazamiento cuando el sistema pasa la carga máxima y llega a ser un 80% de la misma y un desplazamiento de fluencia Δ_y (mm) que se encuentra mediante la intersección de dos rectas, la primera es una recta horizontal trazada a partir de la resistencia máxima y la segunda que inicia en el origen y se extiende por un punto donde la resistencia es 75% la carga máxima, lo que se expone en la Figura 16.

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles/Instituto de Ingeniería Estructural (ASCE/SIE) utiliza la ductilidad de deslizamiento de las estructuras bajo cargas cíclicas para clasificar la ductilidad que pueden ser: baja, moderada y alta. Una ductilidad de desplazamiento menor a 2 se clasifica como demanda de ductilidad baja, de 2 e inferior a 4 se clasifica como moderada, y de 4 o superior se clasifica como demanda de ductilidad alta. [21]

Además de la ductilidad, la capacidad de disipación de energía es también un factor importante que determina el comportamiento sísmico de una estructura. [21]

En la Figura 17. Se representa el método para calcular la energía disipada.

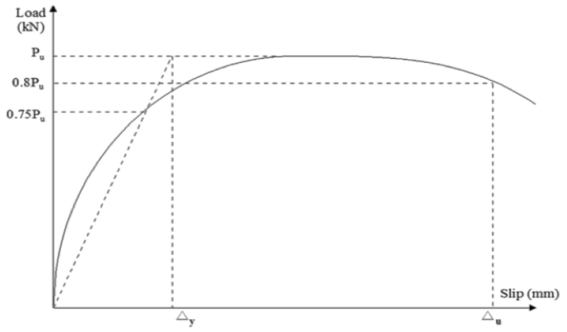


Figura 16. Método para encontrar μ

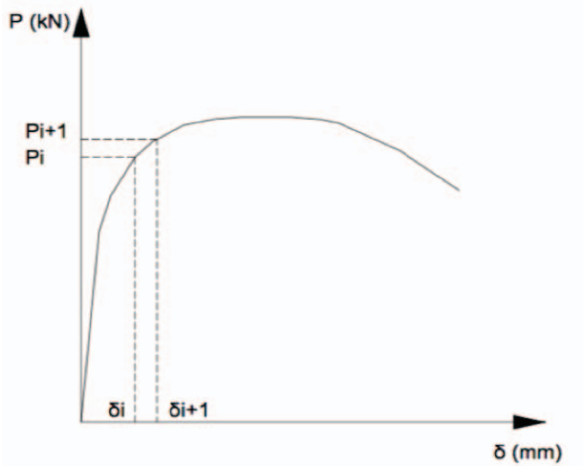


Figura 17. Método para calcular la energía disipada

La energía disipada (T) se mide mediante el cálculo del área bajo la curva de la curva carga-desplazamiento. Se realiza con el método de los rectángulos, donde el ancho del rectángulo está determinado por un intervalo de desplazamiento $\Delta\delta_i$ (mm) y la altura por un intervalo de la carga aplicada ΔP_i (kN). Esto se determina con la ecuación (10) y se representa en la Figura 17.

$$T = \sum \Delta P_i \cdot \Delta\delta_i \qquad (10)$$

En la tabla 2 se presenta el resumen de los resultados de este estudio para ambas posiciones del conector V (45°) y L (90°)

En la Tabla 3 se comparan los resultados de la carga última obtenida del ensayo de las probetas y las cargas nominales obtenidas de las ecuaciones de diseño utilizadas para predecir dicha carga.

Tabla 2. Resumen de resultados

Tipo de ensayo	Ubicación del conector	P_u (kN)		δ_u (mm)	Factor de ductilidad	Rigidez característica (kN/mm)	Energía Disipada (kN·mm)
Monotónico	V (45°)	176,09		11,89	3,03	67,80	1939,09
	L (90°)	159,07		16,09	6,40	65,60	2807,08
Cíclico	V (45°)	195,81		9,37	2,80	66,80	1493,01
	L (90°)	158,39		13,53	5,88	65,48	2295,53

Tabla 3. *Comparación de P_u con ecuaciones de diseño*

Probeta	P_u (kN)	AISC (8)	Error (%)	Eurocódigo 4 (9)	Error (%)	CAN/CSA-S16-01 (10)	Error (%)
P45-1	194,74	116,61	40,12	93,62	51,92	115,92	40,48
P45-2	203,27		42,63		53,94		42,97
P45-3	189,41		38,43		50,57		38,80
		Promedio	40,39	**Promedio**	52,14	**Promedio**	40,75
P90-1	158,74	82,46	48,06	93,62	41,02	81,97	48,36
P90-2	182,53		41,85		33,97		42,19
P90-3	133,91		38,42		30,08		38,79
		Promedio	42,77	**Promedio**	35,02	**Promedio**	43,12
Probeta	**P_u (kN)**	**Bezerra (4)**	**Error (%)**	**Soty & Shima (11)**	**Error (%)**	**Balasubramanian & Rajaram (12)**	**Error (%)**
P45-1	194,74	215,36	10,59	153,34	21,26	113,48	41,73
P45-2	203,27		5,95		24,56		44,18
P45-3	189,41		13,70		19,04		40,09
		Promedio	10,08	**Promedio**	21,62	**Promedio**	42,00
P90-1	158,74	215,36	17,99	108,43	40,60	80,24	56,04
P90-2	182,53		51,89		23,53		43,41
P90-3	133,91		60,82		19,03		40,08
		Promedio	43,57	**Promedio**	27,72	**Promedio**	46,51

V. CONCLUSIONES

La rigidez característica es muy similar en ambas posiciones del conector y con respecto al factor de ductilidad y energía disipada logrados por los conectores de corte ubicados a 90° supera a los desarrollados por los conectores a 45°. Ambos conectores presentan un comportamiento dúctil debido a que su deslizamiento característico δ_{Rk} es mayor a 6 mm, también se halla evidencia de esto cuando una vez alcanzada la carga máxima presentan una disminución de la misma y un aumento del deslizamiento, lo que permite obtener δ_u de acuerdo al Eurocódigo 4 [9] que establece la importancia de no terminar el ensayo una vez alcanzada la carga máxima.

De acuerdo con Kim [21] se puede clasificar el factor de ductilidad obtenido en ductilidad de moderada a alta. También se obtuvo una capacidad de disipación de energía superior comparado a otras configuraciones del conector.

Se puede concluir que la ecuación que más se acopla con los resultados experimentales para los conectores ubicados a 45° es la ecuación (5) obtenida de la investigación Bezerra [4] para conectores en forma a 45° y la ecuación que se acerca a los resultados obtenidos con el conector ubicado a 90° es la ecuación (6) de Soty & Shima [11] que toma en cuenta aparte de la geometría del conector tipo ángulo, un factor importante que es la resistencia a compresión del hormigón.

Comparando los resultados del comportamiento de los conectores de 6 mm de espesor con los conectores de 4 mm de espesor utilizados en la tesis de Franco & Martínez [6]. Para los conectores ubicados a 45° se tiene una carga máxima promedio de 143,20 kN con un deslizamiento δ_u de 13,11

mm, mientras que para los ubicados a 90° una carga máxima promedio de 142,04 kN y un deslizamiento δ_u de 16,50 mm. Estos resultados se distinguen de los obtenidos en esta investigación teniendo valores de cargas máximas y deslizamientos promedio de 195,81 kN con δ_u de 9,37 mm para conectores a 45°, y 158,39 kN con δ_u de 13,53 mm para conectores a 90°, lo que demuestra que aumenta la carga que soportan los conectores a medida que aumenta su espesor, pero también disminuye su capacidad de deslizamiento. Con respecto a la ductilidad y energía disipada de conectores de 6 mm de espesor son similares a los conectores de 4 mm de espesor en la posición a 45°, pero se puede diferenciar que en los conectores ubicados a 90° estas propiedades son mayores a los valores obtenidos por Franco & Martínez [6]

El comportamiento de conectores de 6 mm de espesor con posición 45° y 90° con las posiciones Tipo 1 y Tipo 2 utilizadas en la investigación de Ayala & Chicaiza [7], para las dos ubicaciones de los conectores utilizados en esta investigación los autores encontraron una carga máxima promedio de 58,30 kN. Si se compara este valor obtenido con la carga máxima obtenida en el presente proyecto que es de 195,81 kN, se puede concluir que la posición utilizada por Ayala & Chicaiza [7], soporta una carga mucho menor a la alcanzada con conectores ubicados a 45° y 90°. En cuanto a las propiedades del sistema como ductilidad, rigidez y energía disipada en esta investigación se obtuvieron valores mucho mayores con respecto al experimento de Ayala & Chicaiza, se puede observar que la máxima capacidad de disipación de energía es de 355,02 kN·mm y la obtenida en el actual estudio es de 2295,53 kN·mm.

El mecanismo de fallo presente en todas las pruebas de corte directo fue la fractura del conector de corte por encima del cordón de soldadura. El hormigón resistió con grietas muy pequeñas hasta la carga última, pero al continuar con la deformación del sistema y constatar la fractura de los conectores grandes fisuras en el hormigón fueron evidentes, principalmente en los sectores cercanos al conector de corte y también las fisuras se manifestaron en la base y en las caras laterales de las losas como se puede apreciar en las Figuras 8 y 9.

El uso de las expresiones de las normas AISC, Eurocode y CAN/CAS-S16-01 subestiman considerablemente la resistencia de los conectores estudiados, debido a que estas ecuaciones no son formuladas para el conector tipo ángulo

VI. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración en este estudio al Centro de Investigación de la Vivienda, LEMSUR y Laboratorio de Soldadura, todos de la Escuela Politécnica Nacional. Por su amistad, profesionalismo y asistencia para construcción de las probetas y la ejecución de los ensayos.

VII. REFERENCIAS

[1] Veríssimo, G. S., Paes, J. L. R., Valente, I., Cruz, P. J. S., & Fakury, R. H. (2006). Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost*, *August 2018*, 807–809. https://doi.org/10.1201/b18175-342

[2] Choi, S. M., Tateishi, K., Uchida, D., Asano, K., & Kobayashi, K. (2008). Fatigue strenth of angle shape shear connector used in steel-concrete composite slab. *EASEC-11 - Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, *8*, 199–204.

[3] Shariati, A., Shariati, M., Ramli Sulong, N. H., Suhatril, M., Arabnejad Khanouki, M. M., & Mahoutian, M. (2014). Experimental assessment of angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, *52*, 276–283. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.036

[4] Bezerra, L. M., Cavalcante, O. O., Chater, L., & Bonilla, J. (2018). V-shaped shear connector for composite steel-concrete beam. *Journal of Constructional Steel Research*, *150*, 162–174. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.07.016

[5] Hurtado, X. F., Molina, M., & Linero, D. L. (2008). resistencia grado dos para un sistema de sección compuesta Grade-two resistance screw shear connector behaviour for a composite section system Ensayos de Laboratorio. *Revista Ingeniería e Investigación*, *28*(2), 4–14. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeinv/article/view/14886/15692

[6] Franco, J. R., & Martínez, M. S. (2020). Análisis de la resistencia a corte de los conectores tipo ángulo en losas de hormigón armado sobre estructura metálica. Escuela Politécnica Nacional.

[7] Ayala, D. A., & Chicaiza, C. A. (2021). Análisis de la influencia de los conectores de corte en la unión viga metálica y losas de hormigón armado. Escuela Politécnica Nacional.

[8] AISC, A. I. of S. C. (2016). AISC360/16 Specification for Structural Steel Buildings.

[9] UNE-EN 1994. (2013). Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Asociación Española de Normalización (AENOR).

[10] CAN/CSA-S16-01. (2007). Limit States Design of Steel Structure.

[11] Soty, R., & Shima, H. (2013). Formulation for shear force-relative displacement relationship of L-shape shear connector in steel-concrete composite structures. *Engineering Structures*, *46*, 581–592. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.003

[12] Balasubramanian, R., & Rajaram, B. (2016). Study on behaviour of angle shear connector in steel-concrete composite structures. *International Journal of Steel Structures*, *16*(3), 807–811. https://doi.org/10.1007/s13296-015-0094-0

[13] ACI 318. (2019). Requisitos de reglamento para Concreto Estructural.

[14] ASTM C469M-14. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.

[15] ASTM C31M-17. (2017). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.

[16] ASTM C39M-17b. (2017). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[17] ASTM E8/E8M - 16a. (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Vol. 1, Issue C).

[18] AWS D1.1/D1.1M. (2015). Código de soldadura estructural-acero.

[19] Deng, W., Xiong, Y., Liu, D., & Zhang, J. (2019). Static and fatigue behavior of shear connectors for a steel-concrete composite girder. *Journal of Constructional Steel Research*, *159*, 134–146. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.04.031

[20] Shariati, Mahdi, Ramli Sulong, N. H., Suhatril, M., Shariati, A., Arabnejad Khanouki, M. M., & Sinaei, H. (2013). Comparison of behaviour between channel and angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading. *Construction and Building Materials*, *38*(January), 582–593. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.050

[21] Kim, K. S., Han, O., Choi, J., & Kim, S. H. (2019). Hysteretic performance of stubby Y-type perfobond rib shear connectors depending on transverse rebar. *Construction and Building Materials*, *200*, 64–79. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.070

ACCEPTABILITY OF THE BICYCLE AS ALTERNATIVE TRANSPORT IN THE FINANCIAL SECTOR OF QUITO IN THE CONTEXT OF THE COVID 19 PANDEMIC

ACEPTABILIDAD DE LA BICICLETA COMO TRANSPORTE ALTERNATIVO EN EL SECTOR FINANCIERO DE QUITO EN EL CONTEXTO DE PANDEMIA POR COVID 19

Fredi Augusto Paredes Vásquez
Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Quito, Ecuador
faparedes@puce.edu.ec

Víctor Andrés Núñez Pugarín
Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Quito, Ecuador
vanunez@puce.edu.ec

Susana Masapanta-Carrión
Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Quito, Ecuador
smmasapanta@puce.edu.ec

***Abstract*— For a city to become resilient, smart measures must be taken that can cope with unexpected events such as the arrival of a pandemic or natural disasters caused by climate change and also prevent further destruction of our planet. Transport powered by combustion engines is one of the main emitters of greenhouse gases that increase the temperature of the planet and cause climate change. The public transport service of the city of Quito is the most used by its inhabitants and is mostly made up of combustion engine buses, however, during certain months of the years 2020 and 2021 it was suspended and the capacity was also limited to prevent the spread of the covid-19 virus, as it has become one of the main sources of contagion. The limitation of public transport led to economic, political and social instability. Some citizens and transport operators chose to break the law due to the limitations of public transport. Given the demand for transport, this study calibrated ten multinomial logit econometric models to estimate the probability of acceptance of the bicycle as an alternative mode of transport to public transport and taxis in the financial sector of Quito, using stated and revealed preference surveys. The bicycle is considered as a sustainable means of transport capable of solving the need to move around with social distance and in situations where public transport is limited.**

***Keywords*— Resilient cities, covid-19, transport demand, cycling, econometric models, stated preferences.**

***Resumen* — Para que una ciudad pueda llegar a ser resiliente, se deben tomar medidas inteligentes, capaces de afrontar sucesos inesperados como la llegada de una pandemia o desastres naturales provocados por cambios climáticos y que también eviten que se siga destruyendo a nuestro planeta. Los transportes que funcionan con motor a combustión son uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero que aumentan la temperatura del planeta generando cambios climáticos. El servicio de transporte público de la ciudad de Quito es el más utilizado por sus habitantes y está conformado en su mayoría por buses de motor a combustión; sin embargo, durante ciertos meses de los años 2020 y 2021 fue suspendido y se limitó los aforos, para evitar la propagación del virus covid-19, ya que paso a ser uno de los principales focos de contagio. La limitación del transporte público desembocó en desestabilidad económica, política y social. Algunos ciudadanos y transportistas optaron por incumplir la ley debido a las limitaciones del transporte público. Ante la demanda de transporte, en el presente estudio, se calibraron diez modelos econométricos de tipo Logit multinomial para calcular la probabilidad de aceptación de la bicicleta como un medio de transporte alternativo al transporte público y taxis, en el sector financiero de Quito, empleando encuestas de preferencias declaradas y reveladas. Se considera a la bicicleta como un transporte sostenible capaz de solventar la necesidad de movilizarse con distanciamiento social y en situaciones en las que se limite al transporte público.**

***Palabras claves* — Ciudades resilientes, covid-19, demanda de transporte, bicicleta, modelos econométricos, preferencias declaradas**

I. INTRODUCCIÓN

El COVID-19 es un virus altamente contagioso que dependiendo del sistema inmunológico de cada persona puede provocar efectos secundarios como tos, fiebre, cansancio, pérdidas del gusto o del olfato, sin embargo, en situaciones más complicadas también puede desembocar en dificultad para respirar, perdida de movilidad e incluso la muerte. Debido a la rapidez de propagación del virus por el mundo, la OMS la declaró pandemia el 30 de enero del 2020, también se declaró que el principal foco de contagio son los hospitales y el segundo foco de contagio es el transporte público.

En la ciudad de Quito, capital de Ecuador, previo a la pandemia por covid-19 se estimó que la mayoría de la población quiteña hacía uso del transporte público para movilizarse; sin embargo, para evitar la rápida propagación del virus el 16 de marzo del 2020 el Estado Ecuatoriano declaró un estado de excepción en el que se suspendieron actividades económicas, educativas y el transporte público. En un principio estas medidas ayudaron a evitar el incremento de contagios; pero, con el paso del tiempo desembocó en una inestabilidad económica, política y social para el país dándose

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00028

un incremento en la tasa de desempleo. Debido a esto se empezó a tomar medidas como la reincorporación del transporte público en aforos reducidos hasta habilitarlo a la totalidad de su capacidad.

Debido a la suspensión y limitación del transporte público algunos ciudadanos y transportistas optaron por incumplir los aforos permitidos, exponiendo así sus vidas al aumentar las probabilidades de contagio por covid-19. Estos incumplimientos de los aforos en el transporte público se dieron debido a que la población que no disponía de un vehículo propio tenía que elegir entre tomar el transporte público, para ir a trabajar, o no tomarlo y empeorar su situación económica. Una posible solución a esta problemática podría ser el incremento de ciclovías y el uso de la bicicleta como un medio de transporte alternativo debido a que al ser un transporte individual se reduce considerablemente la probabilidad de contagiarse de covid-19. Otro punto a favor es que es un transporte amigable con el medio ambiente al no producir gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, los cuales incrementan la temperatura del planeta provocando alteraciones en el clima que ocasionan desastres naturales [1].

La implementación de sistemas de transportes sostenibles, que sean amigables con el medio ambiente y de fácil acceso a la población, permiten mejorar la productividad de un país y también ayudan a preservar el planeta. Esto se debe a que los seres humanos requieren recorrer diferentes distancias para poder realizar sus diversas actividades como: trabajar, estudiar o simplemente ir a centros de recreación; sin embargo, para poder recorrer dichas distancias es necesario hacer uso de un transporte y en el caso de los quiteños es el bus el transporte público más usado.

La teoría de utilidad aleatoria permite la calibración de modelos econométricos, también conocidos como modelos desagregados, que permitan representar matemáticamente los escenarios que se desean estudiar a través de funciones de utilidad; las cuales están conformadas por una parte determinista u observable que son todos los atributos que un modelador puede medir y otra parte no observable que representan las decisiones propias de cada individuo al tomar una decisión [2]. De esta manera se puede generar modelos que simulen el comportamiento real que tiene una persona al elegir la alternativa que le represente la mayor utilidad de entre un conjunto de opciones. Para poder obtener la información y elecciones de la población se suelen emplear encuestas de preferencias reveladas y preferencias declaradas [3].

A lo largo de los años se han empleado diversos estudios que emplean modelos desagregados para estudiar la probabilidad de aceptación de la población ante innovaciones o cambios en el sistema de transporte convencional como: la innovación del metro de Suiza [4], cálculo del valor subjetivo de tiempo [5], la aceptación de la población ante el cobro de un nuevo peaje o cobro por tasas de congestión vehicular [6]. Estos modelos permiten estudiar la aceptación de la población ante cualquier cambio como incorporar nuevas metodologías de enseñanza de una institución educativa [7] o la incorporación de un nuevo producto en el mercado.

Debido a la demanda de la población quiteña de un transporte que sea seguro en el contexto de pandemias por enfermedades infectocontagiosas como el covid-19, en el presente estudio se determinará la probabilidad de aceptación de la bicicleta como un medio de transporte alternativo al transporte público y a los taxis; ya que la bicicleta es un transporte sostenible, amigable con el medio ambiente y capaz de superar la barrera del distanciamiento social, la cual es una medida necesaria para evitar que se siga propagando el virus. Para determinar la probabilidad de aceptación de la bicicleta se realizarán encuestas que contienen preferencias declaradas y reveladas a una población muestral del sector financiero de Quito. Posteriormente se calibrarán diez modelos econométricos de tipo Logit Multinomial que permitirán realizar un análisis detallado de la aceptación que tiene los tres transportes considerados. Para la programación de los modelos y cálculos de utilidades se utilizará un software gratuito denominado Biogeme, ya que hasta la fecha es uno de los pocos programas capaces de analizar modelos complejos que consideran atributos o variables que demandan de un mayor análisis [8].

II. Fundamentos Conceptuales

A. Teoría de Utilidad Aleatoria

Los modelos desagregados o econométricos que se mencionan en el presente estudio están fundamentados en la teoría de utilidad aleatoria. Para comprender la teoría de utilidad aleatoria nos podemos imaginar que un individuo **n** tiene que movilizarse de un puno A a un punto B. Para poder movilizarse debe elegir el transporte que le represente la mayor utilidad o beneficio entre un conjunto de alternativas **J** como el bus **j1**, taxi **j2**, bicicleta **j3** o metro **j4**. El individuo elegirá el medio de transporte que le sea más útil en función de los atributos y características propias de cada transporte; las cuales pueden ser el tiempo de viaje, costo de viaje, confort, entre otras. Otro factor importante que debe considerar el individuo son sus propias características o limitaciones como el tiempo que dispone para hacer el viaje, el dinero que tiene, sus gustos y preferencias propias hacia un medio de transporte. Al modelador le interesa medir la utilidad proporcionada por cada individuo **Un,** partiendo de que el individuo elija una alternativa **i** del conjunto de alternativas **J** siempre y cuando la alternativa elegida le represente la mayor utilidad **Uni** en relación con el resto de las alternativas **Unj** [9].

$$U\,i > Unj \quad \forall \quad j \neq i \qquad (1)$$

Dado que la elección de un individuo depende de los atributos propios de cada alternativa o medio de transporte **Xnj** y de los atributos propios de cada individuo **Snj**, el modelador puede determinar una función de utilidad representativa **Vnj** en función de los atributos del medio de transporte y del individuo Vnj=V(Xnj, Sn). Para que la función de utilidad este completa también se debe considerar los atributos propios de cada individuo, los cuales el modelador no puede observar. Estos atributos pueden estar en función de los gustos o preferencias propias de cada individuo o en errores de medición de atributos y se los denota como **Ɛnj**. Conociendo que representa **Vnj** y **Ɛnj** se puede generar la función de utilidad Unj que considera los atributos observables y no observables para el modelador:

$$Unj=Vnj + Ɛnj \qquad (2)$$

Es gracias a la teoría de utilidad aleatoria y el avance en software computacional que en la actualidad se puede realizar análisis de demanda de transporte que sean más eficientes, ya que permiten conocer las preferencias de cada individuo, al elegir un medio de transporte, una vez que se obtienen

resultados de los modelos que el analista considera para realizar el estudio [10].

B. Encuestas de Preferencias Reveladas y Declaradas

Las encuestas de preferencias reveladas permiten obtener información real y existente, permitiendo así generar un modelo que represente el comportamiento real de la población para el tiempo en que se tomó la información. Sin embargo, este tipo de encuestas suele requerir de mayor inversión de tiempo y dinero.

Las encuestas de preferencias declaradas se las emplea cuando no se dispone de información real y existente en el tiempo presente. Este tipo de encuestas permiten generar escenarios hipotéticos que permiten estudiar el comportamiento de la población ante la incorporación de elementos no existentes que se desean incorporar a futuro.

Para obtener información que simule el comportamiento real de la población, es necesario generar escenarios en los que las personas encuestadas puedan considerar diferentes alternativas de elección y los atributos de estas, en función del modelo seleccionado para realizar el estudio. Sin embargo, se debe considerar que al igual que ocurre en el estudio experimental de un fenómeno físico en el laboratorio, para que el experimento represente el comportamiento real del fenómeno, es necesario seguir un adecuado procedimiento y metodología respetando los principios técnicos y teóricos. Cuando se realizan este tipo de encuestas que permiten analizar el comportamiento futuro de la población, es necesario comparar atributos de elementos de las alternativas de elección, que ya existen con la alternativa que se desea implementar.

C. Modelo Logit Multinomial

El modelo Logit multinomial o también conocido como MNL, es uno de los más utilizados dentro del campo de la ingeniería de transportes para realizar diversos estudios de demanda de transporte. Este modelo parte de considerar una distribución de tipo Gumbel la cual es independiente e idénticamente distribuida (IID); lo cual quiere decir que no existe correlación entre las diversas alternativas. Tampoco hay heteroscedasticidad, lo que implica que se tiene las mismas desviaciones estándar para todas las utilidades. El modelo también considera que la media de los errores es igual a cero. La expresión que nos permite calcular la probabilidad de elección se la obtiene al dividir el exponencial de una constante específica **β** multiplicada por la utilidad determinista **Vjn** observable para la sumatoria de todas las alternativas del conjunto de elecciones como se muestra a continuación:

$$P_{jn} = \frac{\exp(\beta * V_{jn})}{\sum_{A_i \in A_{(n)}} \exp(\beta * V_{in})} \qquad (3)$$

Fig. 1. Probabilidad de elección MNL

Al ser un modelo que se fundamenta en la teoría de utilidad aleatoria, la utilidad sistemática **Vjn** depende de los atributos propios de las alternativas y las características del individuo. A este modelo se lo estima mediante una muestra aleatoria y permite obtener la proporción exacta del mercado, ya que considera una constante específica para cada alternativa. Para que el modelo sea eficiente y represente la probabilidad de aceptación exacta se debe considerar algunas de sus limitaciones. La primera limitación es que no puede existir correlación entre las alternativas. La segunda limitación es que no permite variabilidad de los gustos de cada individuo [11].

III. Diseño Metodológico Para Estimación de Modelos

Para la correcta realización de la encuesta y calibración de los modelos MNL, se proponen los siguientes procesos: análisis del área de estudio y la población muestral, diseño y calibración de la encuesta de preferencias declaradas y reveladas, programación de una base de datos que pueda ser cargada en Pandas Biogeme; modelación y calibración de los MNL, cálculo de probabilidades; análisis de resultados.

A. Análisis del Area de Estudio y Población Muestral

Previo a la pandemia por Covid-19 la población de Quito, en su mayoría, hacía uso de tres tipos de transporte para movilizarse y realizar sus diversas actividades, los cuales eran el transporte público, vehículo propio y taxis. Este tipo de transportes emiten gas carbónico, el cual es un gas perjudicial para la salud de los seres humanos y también para la capa de ozono. Otra problemática que se presentó por el aumento de automóviles es el incremento de embotellamientos, provocando que el tiempo de viaje incremente considerablemente a tal punto que para el año 2019 se determinó que Quito presentaba 173 horas anuales de atasco. Partiendo de esa premisa ya era necesario buscar un medio de transporte alternativo que sea amigable con el medioambiente.

Una alternativa de transporte era la bicicleta, ya que de acuerdo con la OMS es un transporte sostenible, de fácil acceso, ecológico, que contribuye a la gestión ambiental y beneficia la salud al requerir de actividad física para su movilidad. Sin embargo, de acuerdo con los últimos datos oficiales del INEC en el año 2017, apenas el 1.42% de los ecuatorianos hacían uso de la bicicleta como un medio de transporte diario; esto se debe a la limitada presencia de ciclovías, lo inseguro que puede llegar a ser el circular con bicicleta por la capital y la necesidad de esfuerzo físico para movilizar el transporte. Con la llegada del COVID-19 se limitó el uso del transporte público para evitar el incremento de contagios; sin embargo, este transporte tiene la mayor demanda por parte de la población quiteña para movilizarse. Por esta razón se planteó el análisis de la bicicleta como medio de transporte alternativo, ya que aparte de las cualidades determinadas por la OMS, la bicicleta también es un medio de transporte seguro ante el covid-19. Al ser un transporte individual disminuye considerablemente la probabilidad de contagio.

El estudio se lo realizó ejecutando una encuesta de preferencias declaradas y rebeladas a una muestra poblacional del sector financiero de Quito, debido a que en este sector se presenta la mayor actividad económica de la capital. El área de estudio está delimitada al norte por la Av. Gaspar de Villarroel, al sur por la Av. Colón, al este por la Av. Eloy Alfaro y un tramo de la Av. 6 de Diciembre y al oeste por la Av. 10 de Agosto. Con la información de las encuestas se programó una base de datos que pueda ser cargada al software Biogeme, en el cual se programó las funciones de utilidad y con la ayuda de modelos tipo Logit multinomial y empleando criterios de máxima verosimilitud, se obtuvo la probabilidad de aceptación de la bicicleta como medio de transporte alternativo.

B. Diseño y Calibración de la Encuesta

En el estudio de análisis de demanda de transporte es necesario analizar variables explicativas como el tiempo y

costo de viaje; cada variable tiene varios niveles de consideración. Cuando se desea diseñar una encuesta de preferencias declaradas empleando un modelo de tipo Logit multinomial, debe existir una adecuada mezcla de las variables o atributos, evitando así el sesgo ente las diversas variables y niveles. Para garantizar una adecuada mezcla se elabora un diseño ortogonal en el que cada atributo varía independientemente del resto de atributos [12].

Al realizar un estudio de preferencias declaradas también es importante considerar el impacto relativo en la varianza que se puede dar al momento de realizar las encuestas PD. El factor que genera un mayor impacto es el número de variables o atributos como el tiempo de viaje, tiempo de espera, o el costo de viaje. El segundo factor es el número de alternativas de elección (bus, auto, taxi, bicicleta); el tercer factor es el número de niveles que posee cada variable y el cuarto factor es el número de escenarios de elección. Tener un excesivo número de variables y de alternativas puede ser negativo con la capacidad de elección contribuyendo con una mayor varianza de error [13].

En el presente estudio, una vez analizado el contexto del sector financiero de Quito, su población y los efectos negativos generados por el covid-19, se determinó tres alternativas de elección: transporte público (bus), taxi y bicicleta. Las cuatro variables o atributos considerados son: el tiempo de viaje total. Esta variable considera tres niveles para cada medio de transporte. Para el bus se considera tiempos de viaje de 29, 33 y 36 minutos; para el taxi se consideran tiempos de viaje de 12, 16 y 20 minutos; para la bicicleta se considera tiempos de viaje de 15, 20 y 25 minutos.

La segunda variable que se considera es el costo de viaje y considera tres niveles para cada medio de transporte: para el bus se consideran costos de 0.35, 0.45 y 0.55 dólares; para el taxi se consideran costos de 2, 2.5 y 3 dólares; para la bicicleta no se consideran costos de viaje. La tercera variable considerada es la influencia de la pandemia. Esta variable contempla si para una persona es influyente o no la presencia del cvid-19 al momento de elegir un transporte y tiene dos niveles los cuales son sí y no. Finalmente, se considera una cuarta variable denominada ciclovía que permite analizar la elección de un medio de transporte en función de si existe o no existe una ciclovía en el sector financiero de Quito. Esta variable cuenta con dos niveles los cuales son sí y no.

Una vez que se han delimitado las cuatro variables se procede a seguir el diseño ortogonal siguiendo el diseño experimental de Kocur para análisis de demanda de transporte con encuestas de preferencias declaradas [14], debido a que se tienen dos variables de tres niveles y dos variables de dos niveles se opta por elegir el diseño experimental 44a; con lo cual se podrá generar una matriz de ortogonalidad que permita una adecuada mezcla de las variables y sus respectivos niveles.

Finalmente, se crean 9 escenarios de elección como se observa en la figura 2. En lo referente a las variables consideradas como preferencias declaradas, las cuales consideran información real de los encuestados, se preguntó la edad de la persona, el sexo (masculino o femenino) y los ingresos mensuales percibidos. Para la variable ingresos mensuales se consideró cuatro niveles; de 0 a 400 dólares, de 400 a 800 dólares, de 800 a 1200 dólares e ingresos mensuales superiores a 1200 dólares.

ESCENARIO 1	BUS	TAXI	BICICLETA
TIEMPO QUE DEMORA EL VIAJE	29 minutos	12 minutos	15 minutos
COSTO DEL VIAJE	$0.35	$2.00	$0.00
SE CONSIDERA QUE ESTAMOS EN PANDEMIA?	SI	SI	SI
EXISTE UNA CICLOVIA PARA EL TIPO DE TRANSPORTE?	-	-	SI

Fig. 2. Escenario tipo de las nueve alternativas existentes

Previo a la ejecución de la encuesta definitiva se realizó una encuesta piloto a una muestra de 60 personas, y se estimó un modelo MNL que permita determinar si existe una adecuada coherencia en los signos de los parámetros estimados, con lo cual se pudo realizar una adecuada calibración de la encuesta. La encuesta definitiva se la realizo en el área de estudio a una muestra representativa de 557 personas.

C. Modelación de los MNL

Con la información obtenida en las encuestas se diseñó una base de datos en formato .csv y .dat, de tal manera que pueda ser cargada en Pandas Biogeme el cual es un software gratuito basado en Python y una de sus principales cualidades es que tiene la capacidad de analizar modelaciones realmente complejas que en años anteriores no eran posible realizarlas, debido a la complejidad de las variables consideradas en las funciones de utilidad [15]. Existen ocasiones en que para poder expresar el escenario de estudio matemáticamente, mediante funciones de utilidad, es necesario emplear variables más complejas y por ende se requiere de modelos de análisis más complejos en los que algunos programas se ven limitados en su capacidad de análisis; sin embargo, en la actualidad Biogeme es uno de los pocos programas que puede analizar dichos modelos sin presentar mayores complicaciones [16].

En el presente estudio, para poder obtener la probabilidad de aceptación de los tres medios de transporte considerados, se plantearon diez modelos de tipo MNL, de los cuales los cuatro primeros permiten estudiar por separado la influencia que tienen las principales variables de estudio. Una vez que se verificó en Biogeme que dichas variables no presentan complicaciones al ser incluidas en las funciones de utilidad, se procedió a generar otros dos modelos concluyentes que permiten representar el objeto de estudio del presente trabajo. Finalmente se estudiaron los cuatro modelos restantes en los que se analiza las preferencias de elección de transporte en función de la edad y el género.

La simbología de las variables para los diez modelos es: TV1 representan el tiempo de viaje para bus, TV2 para taxiy TV3 para bicicleta. C1, C2 y C3 representan el costo de viaje para bus, taxi y bicicleta. La variable denominada EC representa a la variable ingresos mensuales y P representa a la variable pandemia. β1 representa la contante específica del bus, β2 la del taxi y β3 de la bicicleta. En el caso de Biogeme estas constantes específicas están representados como: ASC_BUS, ASC_TAXI Y ASC_BICILETA. Las constantes específicas de las variables son βT para tiempo, βC para costo, βCI para ciclovía, βEC para los ingresos mensuales, y βP para la pandemia, en Biogeme están representadas como B_TIEMPO, B_COSTO, B_CICLOVIA, B_ECONOMIA y B_PANDEMIA. Cabe aclarar que Biogeme entrega como resultados el valor de las constantes específicas, lo cual permite al modelador el cálculo de las utilidades V1 para bus,

V2 para taxi y V3 para bicicleta. Ɛ representa a la parte no observable de las funciones de utilidad.

Los modelos MNL1, MNL2, MNL3 Y MNL4 se programaron con el objetivo de analizar por separado el comportamiento y la coherencia de signos en las variables consideradas para los modelos concluyentes. Para el presente análisis se parte de una modelo base denominado MNL1, que solo considera las variables tiempo de viaje y costos de viaje. Conforme se van analizando el resto de los modelos se va incorporando una variable de estudio al modelo base y se verifica la influencia que tiene cada variable y si los resultados obtenidos son coherentes para cada modelo.

D. Modelos de Estudio

MNL1 es el modelo base. Este considera las variables tiempo de viaje y costo de viaje para determinar la probabilidad de aceptación del transporte público, del servicio de taxi y de la bicicleta. El modelo está representado por las siguientes funciones de utilidad.

$$\begin{aligned} V1 &= \beta 1 + \beta T^{*}TV1 + \beta C^{*}C1 + Ɛ \\ V2 &= \beta 2 + \beta T^{*}TV2 + \beta C^{*}C2 + Ɛ \\ V3 &= \beta 3 + \beta T^{*}TV3 + \beta C^{*}C3 + Ɛ \end{aligned} \quad (4)$$

MNL2 considera las variables tiempo de viaje, costo de viaje y la influencia de la variable pandemia para la toma de decisiones. Está representado por las siguientes funciones de utilidad:

$$\begin{aligned} V1 &= \beta 1 + \beta T^{*}TV1 + \beta C^{*}C1 + \beta P^{*}P + Ɛ \\ V2 &= \beta 2 + \beta T^{*}TV2 + \beta C^{*}C2 + Ɛ \\ V3 &= \beta 3 + \beta T^{*}TV3 + \beta C^{*}C3 + Ɛ \end{aligned} \quad (5)$$

MNL3 considera las variables tiempo de viaje, costo de viaje y la influencia de la variable ciclovía. Está representado por las siguientes funciones de utilidad:

$$\begin{aligned} V1 &= \beta 1 + \beta T^{*}TV1 + \beta C^{*}C1 + Ɛ \\ V2 &= \beta 2 + \beta T^{*}TV2 + \beta C^{*}C2 + Ɛ \\ V3 &= \beta 3 + \beta T^{*}TV3 + \beta C^{*}C3 + BCI^{*}CI + Ɛ \end{aligned} \quad (6)$$

MNL4 considera las variables tiempo de viaje, costo de viaje y la influencia de la variable economía. Está representado por las siguientes funciones de utilidad:

$$\begin{aligned} V1 &= \beta 1 + \beta T^{*}TV1 + \beta C^{*}C1 + \beta EC^{*}EC + Ɛ \\ V2 &= \beta 2 + \beta T^{*}TV2 + \beta C^{*}C2 + Ɛ \\ V3 &= \beta 3 + \beta T^{*}TV3 + \beta C^{*}C3 + Ɛ \end{aligned} \quad (7)$$

TABLA II. CONSTANTES OBTENIDAS EN BIOGEME Y VALIDACIÓN DE LOS DIEZ MODELOS

	Modelos de estudio				**Modelos Concluyentes**		**Modelos preferenciales**			
PARÁMETROS	***MNL1***	***MNL2***	***MNL3***	***MNL4***	***MNL5***	***MNL6***	***MNL7.1***	***MNL7.2***	***MNL8.1***	***MNL8.2***
ASC_BICICLETA	-1.897	-2.143	-2.366	-2.909	-3.175	-3.760	-4.192	-3.09	-5.1725	-1.832
ASC_TAXI	-0.893	-1.190	-0.949	-1.909	-2.229	-2.311	-2.627	-1.658	-4.145	0.695
ASC_BUS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B_TIEMPO	-0.115	-0.122	-0.119	-0.119	-0.126	-0.133	-0.175	-0.021	-0.288	-0.099
B_COSTO	-0.495	-0.487	-0.505	-0.499	-0.491	-0.525	-0.687	-0.249	-0.834	-0.273
B_PANDEMIA	-	-0.289	-	-	-0.306	-0.369	-0.425	-0.248	-0.293	-0.449
B_CICLOVIA	-	-	0.587	-	-	0.641	0.730	0.454	0.679	0.694
B_ECONOMIA	-	-	-	-0.523	-0.526	-0.527	-0.462	-0.796	-0.445	-0.691
Observaciones	5013	5013	5013	5013	5013	5013	3402	1611	2520	2493
ρ2	0.01	0.012	0.016	0.038	0.04	0.05	0.04	0.095	0.06	0.13
L(β)	-5454.35	-5442.58	-5418.21	-5300.94	-5288.49	-5246.46	-3590.79	-1601.80	-2612.13	-2394.13
Cumple signos de hipótesis	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Test Significancia: t ≥ |1,96|	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

E. Modelos Concluyentes

En los modelos MNL5 Y MNL6 consideran las variables analizadas por separado en los primeros cuatro modelos, pero esta vez se las analiza en conjunto y de ellos se obtienen las probabilidades de aceptación concluyentes del presente trabajo.

MNL5 este modelo considera las variables tiempo de viaje, costo de viaje, economía y pandemia, está representado por las siguientes funciones de utilidad:

$$\begin{aligned} V1 &= \beta 1 + \beta T^{*}TV1 + \beta C^{*}C1 + \beta EC^{*}EC + Ɛ \\ V2 &= \beta 2 + \beta T^{*}TV2 + \beta C^{*}C2 + Ɛ \\ V3 &= \beta 3 + \beta T^{*}TV3 + \beta C^{*}C3 + Ɛ \end{aligned} \quad (8)$$

MNL6 este modelo considera las variables tiempo de viaje, costo de viaje, economía y pandemia y ciclovía, está representado por las siguientes funciones de utilidad:

$$\begin{aligned} V1 &= \beta 1 + \beta T^{*}TV1 + \beta C^{*}C1 + \beta EC^{*}EC + Ɛ \\ V2 &= \beta 2 + \beta T^{*}TV2 + \beta C^{*}C2 + Ɛ \\ V3 &= \beta 3 + \beta T^{*}TV3 + \beta C^{*}C3 + \beta CI^{*}CI + Ɛ \end{aligned} \quad (9)$$

F. Modelos Preferenciales

Estos modelos consideran las mismas funciones de utilidad del MNL6; sin embargo, en el programa Biogeme se realiza una segmentación de tal manera que Biogeme solo considere las elecciones almacenadas en la base de datos en función de la edad y el género. El modelo MNL7.1 Considera las preferencias de transporte para movilizarse por el sector financiero de Quito del grupo muestral que tiene una edad entre los quince y treinta años, mientras que el MNL7.2

considera las preferencias de las personas que tienen una edad superior a los treinta años. MNL8.1 Considera las preferencias de los hombres y el MNL8.2 considera las preferencias de las mujeres.

IV. Analisis de Resultados

Una vez realizada la programación y validación de los diez modelos desagregados de tipo MNL, se procede a determinar las probabilidades de aceptación del transporte público, taxi y bicicleta. Biogeme nos entrega el valor de las constantes específicas con lo cual se puede calcular las utilidades y probabilidades de aceptación de los transportes de estudio.

Uno de los principales indicadores de que el modelo es coherente, es determinar si los signos de los parámetros calculados son los mismos que se plantea el investigador a manera de hipótesis como efectos positivos o negativos de la función de utilidad. A manera de ejemplo, se espera que los parámetros relacionados con costo y tiempo sean negativos, ya que, a mayor costo y tiempo de viaje, es menos probable que una persona elija un medio de transporte.

Para que una variable o atributo sea considera como que tiene un efecto significativo, en la función de utilidad también se debe considerar el valor de del t-test, de donde para un nivel de confianza del 95% si $t \geq |1{,}96|$, los atributos tienen un efecto significativo; caso contrario, los atributos no tienen un efecto significativo. Otro indicador que se debe considerar es que, a mayor valor de Rho cuadrado ($\rho 2$), se espera que el modelo sea más coherente. Finalmente, se analizan los resultados de máxima verisimilitud $L(\beta)$ [17].

Con los valores de los parámetros obtenidos en Biogeme se pudo calcular las utilidades y probabilidades de aceptación de los tres tipos de transporte analizados para cada uno de los nueve escenarios de la encuesta de preferencias declaradas. Es importante mencionar que las probabilidades de aceptación obtenidas en los modelos de estudio MNL1, MNL2, MNL3 y MNL4 no son concluyentes; sin embargo, estos modelos permiten analizar por separado el nivel de significancia de las variables economía, pandemia y ciclovía. Los modelos de estudio también permiten identificar patrones de elección de la población muestral que se vuelven a presentar en los modelos concluyentes MNL5 y MNL6. También se repiten en los modelos denominados preferenciales MNL7.1, MNL7.2, MNL8.1 y MNL8.2.

En los diez modelos se puede observar en la Tabla II que las variables consideradas son significativas y cumplen con la hipótesis de signos, por tal motivo se acepta la validez de los modelos analizados.

A. *Análisis de los Modelos de Estudio*

En el análisis de los modelos de estudio no se considera el valor numérico de las probabilidades, ya que no son concluyentes; sin embargo, permiten analizar patrones de elección de la población muestral, que se repiten en los diez modelos analizados.

Una vez calculadas las probabilidades de aceptación del transporte público, taxi y bicicleta, al comparar los resultados obtenidos en el modelo base MNL1 con el modelo MNL4 que considera la variable economía, se determinó que el atributo más influyente al momento de elegir un transporte, son los ingresos mensuales que percibe cada persona. Esto se debe a que del total de la población muestral encuestada se estimó que el 49% perciben ingresos mensuales menores o iguales al salario básico ecuatoriano que para el año 2021 era de cuatrocientos dólares, el 22% perciben ingresos mensuales entre 401 a 800 dólares, el 17% perciben ingresos mensuales entre 801 a 1200 dólares y el 12% restante perciben ingresos mayores a los 1200 dólares. Se infiere por tanto que, a menores ingresos mensuales obtenidos, el transporte público tiene una mayor probabilidad de aceptación; a pesar de ser el transporte que representa mayor riesgo de contraer covoid-19. Otras le los atributos más influyentes son el costo de viaje y el tiempo de viaje de las cuales la variable costo de viaje tiene un mayor nivel significativo.

ESCENARIO	VARIABLES	UTILIDADES			PROBABILIDADES		
	EC	V1	V2	V3	P1	P2	P3
1	SI	-4.141	-4.334	-4.689	41.63%	34.33%	24.05%
2	SI	-4.191	-4.584	-4.689	43.81%	29.58%	26.61%
3	SI	-4.241	-4.834	-4.689	45.64%	25.23%	29.14%
4	SI	-4.616	-4.808	-5.283	42.78%	35.27%	21.95%
5	SI	-4.666	-5.058	-5.283	45.16%	30.49%	24.36%
6	SI	-4.716	-5.308	-5.283	47.17%	26.08%	26.75%
7	SI	-4.972	-5.283	-5.876	46.80%	34.27%	18.94%
8	SI	-5.022	-5.533	-5.876	49.38%	29.61%	21.01%
9	SI	-5.072	-5.783	-5.876	51.60%	25.33%	23.07%
			PROMEDIO		45.99%	30.02%	23.98%

Fig. 3. Utilidades y probabilidades de elección obtenidas con el MNL4

Al comparar las probabilidades de aceptación de los modelos MNL2 y MNL3 con el modelo MNL1, para los nueve escenarios de estudio, se pudo observar que en escenarios en donde se considera la influencia de la variable pandemia y ciclovía, la probabilidad de aceptación de la bicicleta aumenta, mientras que en escenarios donde no se las considera disminuye considerablemente.

Analizando los cuatro modelos de estudio, se pudo observar que en los escenarios en donde el costo de viaje del taxi es mayor o igual a tres dólares, la probabilidad de elección del transporte público y la bicicleta son mayores. La probabilidad de aceptación de la bicicleta supera a la del taxi en escenarios en donde el costo de viajar en taxi es mayor o igual a tres dólares y el tiempo de viaje en bicicleta no supere los veinte minutos.

B. *Análisis de modelos Concluyentes*

En la vida cotidiana para tomar una decisión se considera varias alternativas y de igual manera al elegir un transporte debe considerar su economía. El costo de viajar en transporte, el tiempo que se va a demorar al viajar en transporte y en el contexto de pandemia por covid-19 también debe considerar si: el tomar un transporte más económico pero con mayor aglomeración de personas, o gastar más dinero tomando un taxi para evitar aglomeraciones, o hacer uso de un transporte alternativo como la bicicleta que requiere de esfuerzo físico para movilizarse; pero en términos de evitar contagiarse de covid-19 es un transporte que es más seguro que el taxi.

El modelo MNL5 representa el comportamiento actual que debe elegir la mayoría de la población para movilizarse en el sector financiero de Quito. A diferencia del MNL6 no se considera la variable ciclovía, debido a que en el escenario actual del sector financiero de Quito solo existen algunos tramos de ciclovías en donde se puede transitar con bicicleta; sin embargo, en otros tramos el ciclista debe arriesgar su seguridad y mezclarse con el tránsito convencional. Para validar al modelo se verificó la congruencia de signos en los parámetros del modelo, también se verificó que sus parámetros sean significativos con un nivel de confianza del 95% y como se puede visualizar en la Tabla II, es uno de los modelos con mayor $\rho 2$, por tal razón se procedió a calcular la

probabilidad de aceptación de cada medio de transporte obteniéndose una probabilidad de aceptación promedio del 46% para el transporte público, 30% para el taxi y un 24% para la bicicleta.

ESCENARIO	VARIBLES		UTILIDADES			VARIABLES		
	EC	P	V1	V2	V3	P1	P2	P3
1	SI	SI	-4.669	-4.727	-5.071	38.27%	36.12%	25.61%
2	SI	N0	-4.412	-4.973	-5.071	47.88%	27.34%	24.77%
3	SI	SI	-4.768	-5.218	-5.071	42.10%	26.83%	31.07%
4	SI	NO	-4.869	-5.233	-5.703	46.97%	32.64%	20.39%
5	SI	NO	-4.918	-5.478	-5.703	49.33%	28.17%	22.49%
6	SI	SI	-5.273	-5.724	-5.703	43.71%	27.86%	28.43%
7	SI	SI	-5.554	-5.739	-6.335	43.68%	36.32%	20.00%
8	SI	SI	-5.603	-5.984	-6.335	46.20%	31.58%	22.22%
9	SI	NO	-5.346	-6.229	-6.335	56.01%	23.16%	20.83%
					PROMEDIO	46%	30%	24%

Fig. 4. Utilidades y probabilidades de elección obtenidas con el MNL5

En la figura cuatro, se puede observar las utilidades y probabilidades calculadas del MNL5 para los nueve escenarios de estudio. En los escenarios uno, tres, seis, siete y ocho, en donde si se considera la influencia de la variable pandemia, la probabilidad de aceptación de la bicicleta incrementa al comparar las probabilidades del MNL4, que se pueden visualizar en la figura tres, en donde no considera a esta variable. En los escenarios donde no se consideró influencia de esta variable, la probabilidad de aceptación de la bicicleta disminuye. Se infiere, por tanto, que la pandemia generó mayor aceptación de la bicicleta respecto años anteriores.

En el caso del modelo MNL6 se analizan las mismas variables del modelo MNL5 y se incorpora una nueva variable en el análisis, la cual es la variable ciclovía, lo cual permite representar un escenario hipotético en el que existe una ciclovía que atraviese todo el sector financiero de Quito. Para validar al modelo se verificó la congruencia de signos en los parámetros del modelo, también se verificó que sus parámetros sean significativos con un nivel de confianza del 95% y como se puede visualizar en la Tabla II, es uno de los modelos con mayor ρ2; por tal razón se procedió a calcular la probabilidad de aceptación promedio al de cada medio de transporte obteniéndose nuevamente una probabilidad de aceptación promedio del 46% para el transporte público, 30% para el taxi y un 24% para la bicicleta.

ESCENARIO	VARIABLES					UTILIDADES			PROBABILIDADES		
	TV	C	EC	PA	CI	V1	V2	V3	P1	P2	P3
1	SI	SI	SI	SI	SI	-4.943	-4.960	-5.116	35.40%	34.83%	29.77%
2	SI	SI	SI	N0	SI	-4.627	-5.222	-5.116	46.21%	25.47%	28.32%
3	SI	SI	SI	SI	NO	-4.985	-5.485	-5.758	48.34%	29.33%	22.33%
4	SI	SI	SI	NO	NO	-5.107	-5.492	-6.424	51.33%	34.91%	13.76%
5	SI	SI	SI	NO	SI	-5.159	-5.755	-5.782	47.90%	26.41%	25.69%
6	SI	SI	SI	SI	SI	-5.518	-6.018	-5.782	42.11%	25.56%	32.33%
7	SI	SI	SI	SI	SI	-5.813	-6.025	-6.448	42.77%	34.58%	22.65%
8	SI	SI	SI	SI	NO	-5.865	-6.288	-7.090	51.30%	33.62%	15.08%
9	SI	SI	SI	NO	SI	-5.612	-6.550	-6.448	54.82%	21.44%	23.74%
								PROMEDIO	46.69%	29.57%	23.74%

Fig. 5. Utilidades y probabilidades de elección obtenidas con el MNL6

En la figura cinco, se puede observar las utilidades y probabilidades calculadas del MNL6 para los 9 escenarios de estudio. En los escenarios uno, dos, cinco, seis, siete y nueve, en donde si se considera la influencia de la ciclovía, la probabilidad de aceptación de la bicicleta incrementa al comparar las probabilidades del MNL4 y MNL5 que no consideran a estas variables. En los escenarios donde no se consideró influencia de esta variable la probabilidad de aceptación de la bicicleta disminuye. Se infiere que la construcción de una ciclovía generaría un impacto positivo respecto al uso de la bicicleta, al igual que en el modelo MNL5 y MNL2, en los escenarios en donde se considera la variable pandemia, la probabilidad de aceptación de la bicicleta incrementa respecto a los resultados del MNL4.

C. Análisis de modelos Preferenciales

TABLA III. PROBABILIDADES DE ELECCIÓN PROMEDIO DE MODELOS PREFERENCIALES

Modelos	Probabilidades de aceptación promedio		
	Bus	***Taxi***	***Bicicleta***
MNL7.1	42.94%	28.50%	25.55%
MNL7.2	60.68%	25.15%	14.17%
MNL8.1	38.56%	25.02%	36.42%
MNL8.2	56.24%	31.54%	12.22%

Los modelos MNL7.1 y MNL7.2, consideran las mismas variables del modelo MNL6, estos modelos permiten el análisis de las preferencias de la población muestral en función de dos grupos de edad. El primer grupo comprende a las personas que tienen una edad entre quince y treinta años y está representado por el 68%, el segundo grupo comprende a las personas que tienen una edad superior a los treinta años y está representado por el 32% del total de la muestra. El modelo MNL7.1 considera las preferencias de las personas que tienen una edad entre quince y treinta años con una probabilidad de aceptación de la bicicleta del 26% mientras que el modelo MNL7.2 considera las preferencias de las personas con edad mayor a los treinta años con una probabilidad de aceptación de la bicicleta del 14%.

Analizando las probabilidades de aceptación promedio de los modelos MNL8.1 y MNL8.2 presentadas en la Tabal III, para las tres alternativas de transporte, se puede inferir que la probabilidad de aceptación de la bicicleta es mayor para el grupo poblacional que tiene género masculino; ya que se determinó una probabilidad de aceptación 36.42%, mientras que para las personas que tienen género femenino la probabilidad de aceptación de la bicicleta decrece al 12.22%.

En función de lo analizado en los modelos preferenciales, se puede determinar que el grupo poblacional que tiene una mayor probabilidad de elegir a la bicicleta como un medio de transporte alternativo, para transportarse por el sector financiero de Quito, son hombres que tengan una edad entre quince y treinta años mientras que el grupo poblacional que tendría una menor probabilidad de elección de la bicicleta serían mujeres que tengan una edad mayor a los treinta años.

V. CONCLUSIONES

Con la investigación realizada se determinó, de acuerdo a los resultados obtenidos en los modelos concluyentes MNL4 Y MNL5, que la probabilidad de aceptación de la bicicleta como medio de transporte alternativo en el sector financiero de Quito fue del 24% en el contexto de pandemia por covid-19; lo cual nos indica que las restricciones de movilidad y el temor de los ciudadanos de contagiarse del virus generó un cambio en la psicología favorable respecto al uso de la bicicleta al compararlo con aceptaciones de años anteriores. El transporte público sigue teniendo la mayor probabilidad de aceptación con un 46% y el taxi tuvo una probabilidad de aceptación del 30%.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el factor económico es el que tiene un mayor nivel de significancia al momento de elegir un medio de transporte, ya que la variable más influyente fue la denominada economía la cual considera los ingresos mensuales percibidos de la población muestral; la otra variable significativa fue el costo de viaje. Esto se debe a que la mayoría de la población encuestada percibe ingresos mensuales menores o iguales al salario básico unificado, el cual era de cuatrocientos dólares durante el año 2021. Esto se puede corroborar haciendo un análisis en las probabilidades de aceptación promedio del MNL4, MNL5 y MNL6 que incorporan la variable economía y se obtienen probabilidades de aceptación promedio similares en los tres modelos con un 46% de aceptación para el transporte público, 30% para el taxi y 24% para la bicicleta.

La bicicleta es un transporte sostenible, que aparte de evitar el contagio de una enfermedad infectocontagiosa como lo es el covid-19, no generar gases contaminantes para el planeta. También permite que los ciudadanos se ejerciten y puedan mejorar su estado físico. De acuerdo con el análisis del modelo MNL3, MNL6, MNL7.1, MNL7.2 y MNL8.2, en los escenarios que se considera la existencia de una ciclovía, la probabilidad de aceptación de la bicicleta incrementa respecto a los modelos en donde no se considera la influencia de esta variable en sus funciones de utilidad, por tal motivo se considera que la construcción de ciclovías tiene un impacto positivo para la población al momento de elegir la bicicleta como un medio de transporte alternativo.

De acuerdo con el análisis de los modelos preferenciales MNL7.1, MNL7.2, MNL8.1 y MNL8.2, se considera que las personas que tienen una edad entre los quince a treinta años tienen una mayor probabilidad de aceptación de la bicicleta 26%, que la aceptación de las personas mayores de treinta años 14%. De manera similar, las personas que tienen género masculino tienen mayor probabilidad de aceptación de la bicicleta 36%, que la aceptación de las personas de géneros femenino 12%. Se considera que uno de los posibles limitantes de usar bicicleta es que se requiere de esfuerzo físico, posibilidad de transpirar y alteración en la estética de las personas, lo cual se podría solucionar en cierta medida haciendo uso de bicicletas eléctricas.

La probabilidad de aceptación de la bicicleta como medio de transporte para movilizarse por el sector financiero de Quito del 24%, refleja un aumento considerable respecto al de años anteriores. Esto se debe en gran medida al temor de las personas de contagiarse por covid-19 y a las limitaciones en los aforos permitidos del transporte público. Se recomienda realizar un estudio similar en el que se pueda emplear teoría de utilidad aleatoria y modelos desagregados para estimar la probabilidad de aceptación de la bicicleta, una vez que finalice la pandemia y de esta manera poder determinar si el impacto positivo que tuvo la pandemia respecto al uso de la bicicleta se mantiene, aumenta o disminuye, dada la importancia de usar transportes que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Previo a la implementación de un nuevo sistema de transporte, aumento en el cobro de peajes, cálculos del valor subjetivo o en la implementación de cualquier medida en el sistema de transporte, se recomienda realizar este tipo de estudios preliminares, implementando modelos econométricos y haciendo uso software avanzados como Biogeme que permiten el análisis de modelos complejos; debido a que este tipo de estudios permiten simular la aceptación que tienen una población en función de sus elecciones y evitar pérdidas económicas para el estado o sistemas fallidos de transporte.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, a nuestros familiares y a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por el apoyo y ayuda proporcionada.

REFERENCES

[1] X. Zhao, Y. Ke, J. Zuo, W. Xiong, and P. Wu, "Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019," Journal of Cleaner Production, vol. 256. Elsevier Ltd, May 20, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120404.

[2] M. Bierlaire and V. Lurkin, "Introduction to Disaggregate Demand Models," in The Operations Research Revolution, INFORMS, 2017, pp. 48–67. doi: 10.1287/educ.2017.0169.

[3] L. G. W. Juan de Dios Ortúzar, Modelos de Transporte. PUblican, 2008.

[4] G. Lausanne Bern Zurich St Gallen, M. Bierlaire, E. K. Lausanne Axhausen, and E. G. Zürich Abay, "The acceptance of modal innovation: The case of Swissmetro," Mar. 2001. [Online]. Available: www.swissmetro.com

[5] M. Gutiérrez-Torres and V. Cantillo-Maza, "Classic and Bayesian Estimation of Subjective Value of Time," DYNA (Colombia), vol. 81, no. 187, pp. 158–166, Oct. 2014, doi: 10.15446/dyna.v81n187.40863.

[6] J. C. Jiménez Serpa and M. H. Salas Rondón, "Aplicación de modelos econométricos para estimar la aceptabilidad de una tasa por congestión vehicular," INGE CUC, vol. 13, no. 2, pp. 60–78, Jul. 2017, doi: 10.17981/ingecuc.13.2.2017.08.

[7] N. E. Flórez-Oviedo, "Estudio de preferencias declaradas sobre metodologías de enseñanzas constructivistas," Revista Educación en Ingeniería, vol. 14, no. 27, pp. 83–88, 2018, doi: 10.26507/rei.v14n27.952.

[8] N. Ortelli, T. Hillel, F. C. Pereira, M. de Lapparent, and M. Bierlaire, "Assisted specification of discrete choice models," Journal of Choice Modelling, vol. 39, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jocm.2021.100285.

[9] T. Domencich and D. McFadden, "Urban travel demand: a behavioural analysis," Transport and Road Research Laboratory (TRRL), 1975.

[10] D. McFadden, "Economic Choices," American Economic Review 91, pp. 351–378, 2001. doi: 10.1257/aer.91.3.351.

[11] K. E. Train, MÉTODOS DE ELECCIÓN DISCRETA CON SIMULACIÓN. 2009.

[12] J. Ortúzar and C. Román, "El problema de modelación de demanda desde una perspectiva desagregada: el caso del transporte," 2003.

[13] S. Caussade, J. de D. Ortúzar, L. I. Rizzi, and D. A. Hensher, "Assessing the influence of design dimensions on stated choice experiment estimates," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 39, no. 7, pp. 621–640, 2005, doi: 10.1016/j.trb.2004.07.006.

[14] G. Kocur, T. Adler, W. Hyman, and B. Aunet, "Report UMTA-UTP-Guide to forecasting travel demand with direct utility assessment," Wash. D.C, 1982.

[15] M. Bierlaire, "A short introduction to PandasBiogeme," Lausanne, Jun. 2020.

[16] J. Haan, L. A. Garrow, A. Marzuoli, S. Roy, and M. Bierlaire, "Are commuter air taxis coming to your city? A ranking of 40 cities in the United States," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 132, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103392.

[17] M. Bierlaire, "Calculating indicators with PandasBiogeme," Lausanne, Dec. 2018.

REAL-TIME HYBRID SIMULATION: APPLICATION TO THE EVALUATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A BUILDING WITH REINFORCED CONCRETE THIN WALLS AND NON-CONNECTED SEISMIC ISOLATORS

SIMULACIÓN HÍBRIDA EN TIEMPO-REAL: APLICACIÓN EN LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA EDIFICACIÓN CON MUROS DELGADOS DE CONCRETO REFORZADO Y AISLADORES SÍSMICOS NO-CONECTADOS

Bryan Castillo Torres
Escuela de Ingeniería civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
bryan.castillo@correounivalle.edu.co

Sharick Vides Quintero
Escuela de Ingeniería civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
sharick.vides@correounivalle.edu.co

Johannio Marulanda Casa, PhD.
Escuela de Ingeniería civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
johannio.marulanda@correounivalle.edu.co

Peter Thomson, PhD.
Escuela de Ingeniería civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
peter.thomson@correounivalle.edu.co

***Abstract*— In LATAM, and special in Colombia, the implementation of the Industrialized System (IS), which consists of buildings with reinforced concrete thin walls (RCTW), has generated an important reception in the industry due to its technical and economic advantages. However, different investigations have reported that the structural performance of the RCTW presents low ductility, instability outside the plane, presence of brittle failures, among other aspects. Therefore, the base isolation technique is seen as a reliable and accessible alternative to reduce the vulnerability of these buildings in a seismic event. Conventionally, for the analysis of isolated structures, numerical models with simplified hysteresis are used for a specific deformation condition in the insulators. This ignores the non- linearities present along different deformation states. In order to consider a full dynamic of the seismic isolators, an experimental technique known as: Real Time Hybrid Simulation (RTHS) was implemented. This technique substructure the isolated RCTW building into a numerical, corresponding to a model of the structure; and an experimental component, in which test specimens were used non-connected elastomeric insulators on a reduced scale. Finally, the responses of the isolated structure in ETABS19 are compared with those obtained in the RTHS tests under four seismic events, obtaining similar performance levels for isolator deformations close to 100%. But, for lower deformation levels the simulated responses in ETABS19 are greater due to effective damping ratios close to 4% compared to 10% in the RTHS tests.**

Keywords*— Reinforced concrete thin walls; non-connected isolators; finite element models; Hybrid Real-Time Simulation; transfer system.

***Resumen* — En Latinoamérica, y en especial en Colombia, la implementación del Sistema Industrializado (SI), que consiste en edificaciones de muros delgados de concreto reforzado (MDCR), ha generado una acogida importante en la industria debido a sus ventajas técnicas y económicas. Sin embargo, diferentes investigaciones han reportado que su desempeño estructural presenta baja ductilidad, inestabilidad fuera del plano, presencia de fallas frágiles, entre otros aspectos. Es por ello que, la técnica de aislamiento en la base se divisa como una alternativa confiable y accesible para disminuir la vulnerabilidad de éstas edificaciones en un evento sísmico. Convencionalmente, para el análisis de estructuras aislada se utilizan modelos numéricos con histéresis simplificadas para una condición de deformación especifica en los aisladores. Lo anterior ignora las no-linealidades presentes a lo largo de diferentes estados de deformación. Con el fin de considerar una dinámica completa de los aisladores, se implementó una técnica experimental conocida como: Simulación Híbrida en Tiempo-Real (SHTR). Esta técnica subestructura la edificación de MDCR aislada en un componente numérico, correspondiente a un modelo de la estructura; y uno experimental, en la cual se emplearon probetas de aisladores elastómericos no-conectados a escala reducida. Finalmente, las respuestas de la estructura aislada en ETABS19 se comparan con las obtenidas en los ensayos de SHTR para cuatro eventos sísmicos, obteniendo niveles de desempeño similares para deformaciones de aisladores cercanos a 100%. Pero, para niveles de deformación menores las respuestas simuladas en ETABS19 son mayores debido a razones de amortiguamiento de alrededor del 4% en comparación con el 10% que presentan las pruebas de SHTR.**

Palabras claves — Muros delgados de concreto reforzado; aisladores no-conectados; modelos elementos finitos; Simulaciones Híbridas en Tiempo Real; sistema de transferencia.

I. INTRODUCCIÓN

Según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) las condiciones geológicas y sismológicas del país implican que el 87% de la población se

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00029

encuentra en zonas de riesgo sísmico considerable [1], lo cual genera la necesidad de desarrollar e implementar tecnologías emergentes que reduzcan la vulnerabilidad de las estructuras. En los últimos años, el objetivo de la ingeniería estructural es el de gestionar infraestructura civil resilientes con el fin de garantizar la seguridad de sus ocupantes y un desempeño estructura óptimo [2]. Este nuevo enfoque integral procura sistemas estructurales capaces de recuperarse, de forma eficiente, luego de estar expuestas a cargas dinámicas fuertes, como en el caso de un evento sísmico.

La ingeniería estructural en Latinoamérica, y en especial en Colombia, se ha orientado al desarrollo constructivo con ventajas técnicas y económicas debido a la creciente demanda de vivienda en sectores urbanos y al acelerado desarrollo del sector constructivo [3]. Bajo estos lineamientos, la implementación del Sistema Industrializado (SI), que consiste en edificaciones de muros delgados de concreto reforzado (MDCR) con altos rendimientos en su ejecución debido a su proceso constructivo óptimo, que involucran formaletas metálicas modulares, y reducción en la mano de obra respecto a sistemas constructivos tradicionales [4]; ha generado una acogida importante en la Industria de la construcción nacional. Las edificaciones con este sistema se caracterizan por presentar muros de bajo espesor entre 80 a 150 mm, con refuerzo electrosoldado en el alma, dispuesto en una sola cortina en la mayoría de los casos y con cuantías de refuerzo típicas de 0.25%, correspondientes a las mínimas exigidas en la NSR-10 [1][5]; además, se utilizan concretos de alta fluidez y se mezclan con aditivos acelerantes para obtener la resistencia de diseño a edades tempranas, lo que permite frecuentemente fundiciones monolíticas entre muros y losas de un piso completo en un solo día [6][7]. Los MDCR en ocasiones requieren de elementos de borde conformados de refuerzo longitudinal con acero convencional dúctil confinado por ganchos o estribos cerrados y conservando el espesor del alma. Las losas de entrepiso son placas macizas de concreto reforzado, con espesores característicos de 100 a 200 mm, y con malla electrosoldada que conforma su refuerzo. Esta tecnología se ha posicionado como el segundo sistema estructural más empleado en Colombia (34.5%) para la construcción de vivienda en las principales ciudades del país y se ha constituido como una alternativa eficiente para afrontar el déficit habitacional de la región [8]. Sin embargo, luego de los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011), diferentes investigaciones han reportado, incluso para espesores de muro mayores, que el desempeño estructural de estos muros puede ser limitado al presentar baja ductilidad, baja capacidad de disipación de energía, inestabilidad fuera del plano, presencia de fallas frágiles, entre otros aspectos [9]-[12]. Adicionalmente, a nivel local las edificaciones de MDCR presentan altas relaciones de esbeltez y refuerzos en una sola capa, incrementando su susceptibilidad a inestabilidades fuera del plano [5][13]. También, se presentan configuraciones de acero inadecuadas y utilización de materiales de baja ductilidad, aumentando las condiciones de inestabilidad fuera del plano [10][14]; sumado, al inadecuado confinamiento en zonas extremas para resistir las altas demandas a flexo-compresión; generando dificultades constructivas y limitaciones en la capacidad de deformaciones internas en los muros [15].

Debido a las limitaciones del comportamiento dinámico de edificaciones con SI y a las condiciones de riesgo sísmico presentes en Colombia se generan la necesidad de implementación de mecanismos de control que reduzcan la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras. Debido a lo anterior, se han realizado múltiples estudios y aplicaciones que han comprobado la efectividad de los sistemas de control para reducir esta problemática [16]. Posicionando a los dispositivos de control pasivo como una alternativa para la gestión integral de la infraestructura civil resilientes. Dentro de los sistemas de control pasivo, la técnica de aislamiento en la base se divisa como una alternativa fiable y rentable para disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones con MDCR durante un evento sísmico. Convencionalmente, para el análisis de estructuras aislada se utilizan modelos numéricos con histéresis simplificadas para una condición de deformación especifica en los aisladores. Con el fin de considerar la dinámica completa del aislador, se implementa una técnica experimental conocida como: Simulación Híbrida en Tiempo-Real (SHTR) [17]. Esta metodología permite dividir el sistema estructural, mediante subestructuración dinámica, en un componente numérico y uno experimental. La interacción entre ambas subestructuras se realiza en cada paso de tiempo permitiendo la retroalimentación constante del componente experimental en la subestructura numérica y viceversa [18].

II. SIMULACIÓN HIBRIDA EN TIEMPO-REAL

En las últimas décadas se destaca una innovadora técnica de investigación para la evaluación del comportamiento dinámico de sistemas estructurales, denominada comúnmente como Simulaciones Híbridas en Tiempo-Real (SHTR) [17][19]-[21]. Esta técnica consiste en combinar los análisis numéricos y experimentales, utilizando los beneficios presentes en ambos conceptos. Las SHTR son una metodología experimental en la cual la porción más crítica o de interés en el sistema, que generalmente expone un comportamiento no-lineal, es testeada experimentalmente. Mientras que el resto del sistema, que presenta un comportamiento predecible numéricamente con alto grado de precisión, es simultáneamente analizado en un modelo numérico. Ambos componentes se denominan subestructura experimental y numérica, respectivamente. Las subestructuras son interconectadas mediante la implementación de actuadores (sistemas de transferencia) y sensores que proveen los medios para la interacción entre ambas subestructuras, formando un bucle para resolver la respuesta dinámica del sistema en cada paso de tiempo [22]-[24], tal como se muestra esquemáticamente en la subestructuración de una edificación ante un evento sísmico, *Fig.1*. Esta novedosa técnica de investigación tiene el potencial, dada su versatilidad, de simular la respuesta dinámica de especímenes a gran escala lo que la hace una metodología aplicable a los sistemas estructurales civiles en general [25][26]. Además, La ventaja de las SHTR radica en el hecho de concentrar los recursos en la parte critica o de

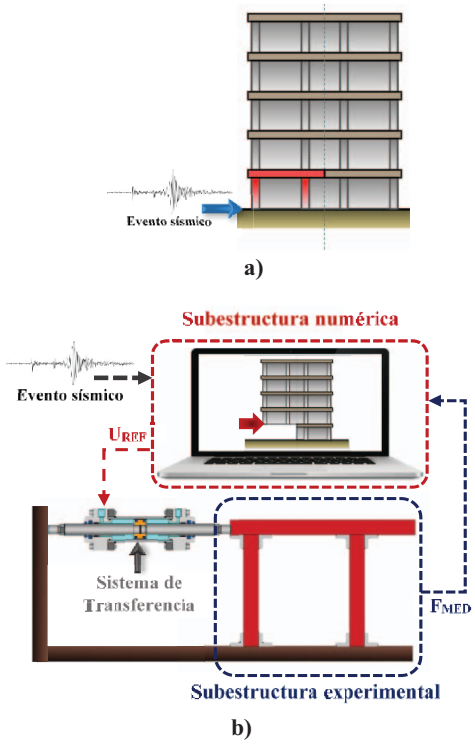


Fig. 1 a) *Edificación con carga sísmica.* ***b)*** *Subestructuración de una porción de un nivel de una edificación ante un evento sísmico*

interés del sistema teniendo como resultado menores costos, mejores rendimientos de tiempo y mayor desempeño frente a las limitaciones de capacidad comparado con experimentación dinámica a gran escala tradicional (STT, ensayos cuasi-estáticos, etc.), y lo más imprescindible, sin perder la fiabilidad y precisión en las respuestas dinámicas del sistema estructural completo [27]-[34]. Adicionalmente, las SHTR tienen la capacidad de reproducir fielmente la velocidad, lo que permite realizar investigaciones en la ingeniería sísmica para evaluar las respuestas locales y globales del sistema estructural, y de las tecnologías de mitigación de vulnerabilidad sísmica [35][25].

Debido a estas notables ventajas técnicas, se aplicó la técnica de SHTR para la evaluación dinámica de la edificación de MDCR con aisladores sísmicos no-conectados, tal como se plantea esquemáticamente en la Fig.2. La SHTR se realizó a una frecuencia de 1024 *Hz*, con una alta precisión de respuesta dinámica debido a la utilización de la mesa sísmica unidireccional y del marco de pruebas de aisladores a escala de la Universidad del Valle, como sistemas de transferencia, para la interacción entre las subestructuras experimentales y numéricas. Este planteamiento permitió considerar, bajo ciertas teorías de semejanza de escalas, las no-linealidades de los aisladores presentes a lo largo de diferentes estados de deformación, en condiciones operativas de la edificación durante un evento sísmico [36].

A. Estructura de Referencia

La estructura de referencia corresponde a una edificación de vivienda típica de baja altura en Colombia, específicamente de la ciudad de Santiago de Cali, diseñada con el SI de MDCR, y a la cual, se le implementó un sistema de aislamiento sísmico de acuerdo con el procedimiento estipulado en el FEMA 450 [37] y la metodología recomendado por [38] para aisladores no-conectados. Su sistema estructural se conforma de MDCR, losas de entrepiso de 80-100 mm de espesor; Además, dispuesto con concretos de 21 MPa y con densidad de muros promedio de 2.0% y 2.5%, para las direcciones longitudinales y transversales del edificio. La edificación consta de seis losas con alturas entre piso de 2.5 m y dimensiones en planta de 16.5 y 13.7m en las direcciones X y Y, respectivamente, Fig. 3a. Con el fin de alcanzar una distribución de carga uniforme se dispuso una losa maciza de 100mm de espesor, vigas de 400x500 mm y 400x400 mm las cuales soportan los muros y transmiten la carga a los 12 aisladores elastómericos no conectados ubicados en la base, como se muestra en la Fig. 3b. La evaluación del comportamiento dinámico se realizó en el software ETABS19 utilizando elementos tipo Shell-membrane para losas, Shell-Thin para muros y Frame para las vigas y con la suposición de diafragma rigido en las losas. En la condición de base fija se consideró un porcentaje de amortiguamiento estructural ζ = 5% y las frecuencias en las direcciones X y Y, en los dos primeros modos, fueron de 4.46

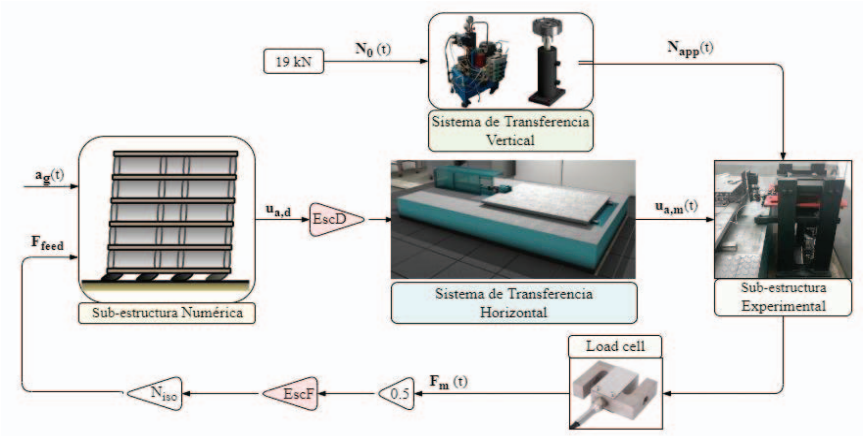


Fig. 2 *Esquema de la SHTR de una Edificación de MDCR con aislamiento en la base*

y 4.77 Hz, respectivamente. Mientras que, para la condición aislada se alcanzó el periodo objetivo de 1.92s, logrando un comportamiento de cuerpo rigido en la superestructura soportada sobre el sistema de aislamiento. Debido a la utilización de un porcentaje de amortiguamiento estructural ζ=0%, con el fin de garantizar únicamente el amortiguamiento suministrado por el comportamiento histerético de los aisladores no-conectados. El sistema de aislamiento a escala real (12 aisladores elastómericos no-conectados) se diseñó a partir de las normas y recomendaciones anteriormente mencionadas. Utilizando el espectro de diseño de la micro zona No.1 de la ciudad de Santiago de Cali [39] con una Pseudoaceleración máxima de 0.75g, un periodo objetivo de 1.9 s y una deformación de diseño de 100%. Se contemplaron 62 capas de caucho y 61 capas de fibra con espesores de t_r = 5.5 mm y t_f =1.0 mm, respectivamente, alcanzando una altura total de H = 400 mm y un diámetro 910 mm. Estos aisladores diseñados se implementaron en el software ETABS19 considerando un comportamiento no-lineal para los grados de libertad longitudinales X y Y [40], con un modelo de histéresis bilineal.

B. Subestructura Numérica (SN)

Con el fin establecer un modelo analítico más versátil para la SN se implementó un modelo de elementos finitos (FEM) de la edificación de MDCR, analizado únicamente en el eje Y, a partir de los resultados del análisis dinámico realizado en el software ETABS19. Además, se incluyendo elementos que simulaban los aisladores, y así, incluir el efecto Rocking, característico de este tipo de aisladores y observado por algunos autores [36]. Este modelo compuesto por 12 nodos y 28 elementos rígidos se ajustó para un análisis de excitación en la base sinusoidal con amplitud constante con frecuencias entre 0.1-20 Hz. Inicialmente se planteó como un modelo de 36 GDL (3 GDL por nodo), Fig. 4a; sin embargo, se aplicó el método de condensación estática para considerar únicamente los GDL translacionales y la distribución de masa planteada, Fig. 4b y Fig. 4c, respectivamente. La ecuación de movimiento que representa el comportamiento dinámico de la estructura se presenta en (1), donde **Mr**, **Cr** y **Kr** son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez representativas del modelo simplificado de 24 GDL; y x, $\dot{x}$ y $\ddot{x}$ corresponden a los estados de desplazamiento, velocidad y aceleración relativos. Se aplicó la metodología de subestructuración dinámica [28][29] con el fin de extraer las propiedades dinámicas de los aisladores y permitir una retroalimentación a la estructura con la fuerza medida experimentalmente, como se plantea en (2).

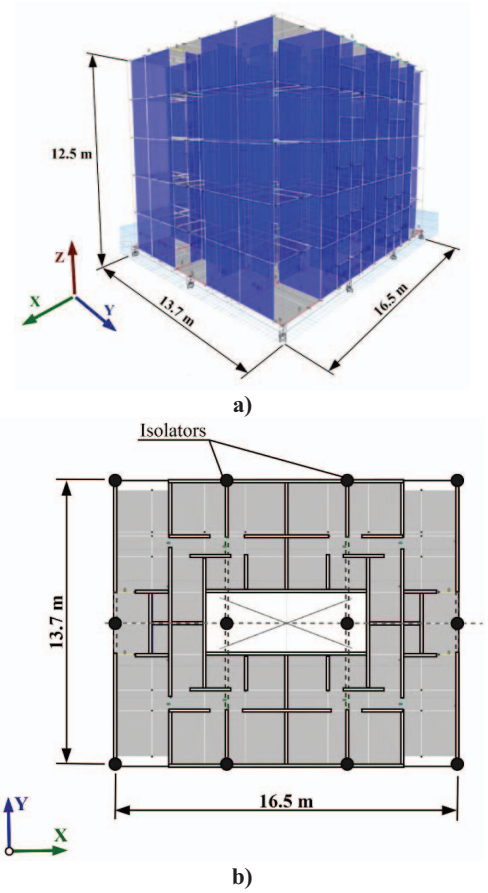


Fig. 3 *Isometría de la edificación del modelo en el software ETABS:* ***a)*** *Isometría:* ***b)*** *Planta.*

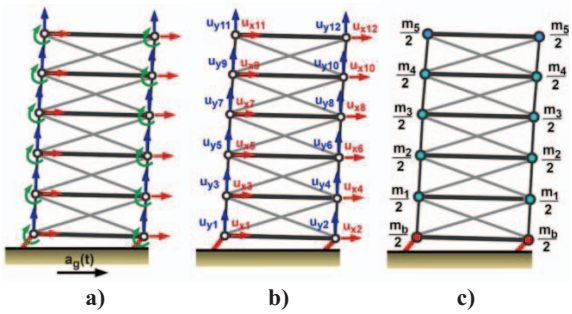


Fig. 4 *Modelo de FEM de la edificación* ***a)*** *36 GDL;* ***b)*** *24 GDL;* ***c)*** *Distribución de masas*

$$M_r\{\ddot{x}\} + C_r\{\dot{x}\} + K_r\{x\} = -M_r\Gamma_g a_g \tag{1}$$

$$M_n\{\ddot{x}\} + C_n\{\dot{x}\} + K_n\{x\} = -M_r\Gamma_g a_g - \Gamma_f F_{feed} \tag{2}$$

La fuerza restauradora, producto de la fuerza experimental registrada de los aisladores, está determinada por el término $\Gamma_f F_{feed}$, donde el vector de influencia $\Gamma_f = [1\ 1\ 0 \dots 0]^T$ indica los GDL donde es aplicada. De igual manera, a_g representa la aceleración del suelo y el vector $\Gamma_g = [1\ 1\ 1 \dots 1]^T$ indica su incidencia en los GDL correspondientes. Despreciando la masa aportada por los aisladores, al ser muy menor a la de la estructura, permite plantear el espacio de estados, como se muestra en (3) y (4), para dos entradas (a_g y F_{feed}) y 24 salidas correspondiente a cada GDL.

$$\begin{Bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\end{Bmatrix}_{[48x1]} = \begin{bmatrix}0 & I\\ -M_n{}^{-1}K_n & -M_n{}^{-1}C_n\end{bmatrix}_{[48x48]}\begin{Bmatrix}x\\ \dot{x}\end{Bmatrix}_{[48x1]} + \cdots$$
$$\cdots \begin{bmatrix}0 & 0\\ -\Gamma_g & -M_n{}^{-1}\Gamma_f\end{bmatrix}_{[48x2]}\begin{Bmatrix}a_g\\ F_{feed}\end{Bmatrix}_{[48x1]} \tag{3}$$

$$\{U\}_{[24x1]} = [0 \quad I]_{[24x48]}\begin{Bmatrix}x\\ \dot{x}\end{Bmatrix}_{[48x1]} + [0 \quad 0]_{[24x2]}\begin{Bmatrix}a_g\\ F_{feed}\end{Bmatrix}_{[48x1]} \tag{4}$$

C. Substructura Experimental (SE)

Para la subestructura experimental se emplearon dos probetas de aisladores elastómericos circulares no-conectados a escala reducida, con el fin de simular el comportamiento dinámico real del sistema de aislamiento de la edificación con MDCR. Se tomó como punto de partida, las propiedades mecánicas de los aisladores a escala real descritos en la sección II.A. Iniciando con la altura de caucho para los especímenes escalados de $H_E^* = 30\ mm$, el cual nos determina un factor de forma $F_H = 11.37$; la relación diámetro-altura de caucho $D/H = 2.67$ se mantuvo en ambos casos (caso real y reducido), dando como resultado un diámetro escalado $D = 80\ mm$. Además de estos factores, el objetivo fue conservar el mismo factor de degradación de 0.41 y el amortiguamiento efectivo $\beta_{eff} = 14\%$, puesto que estos determinan el comportamiento histerético y la capacidad de disipación del aislador. Lo anterior nos determina un factor por rigidez $F_R = 11.52$. Se observa una discrepancia en los factores F_H y F_R debido a las aproximaciones realizadas en el dimensionamiento, con la finalidad de facilitar el proceso constructivo de las probetas. Se fabricaron dos probetas de aisladores elastómericos no-conectados a escala reducida (Fig. 5a), compuesta por 15 capas de fibras de caucho de 2mm de espesor y refuerzo de 14 capas de fibra de poliéster de 1 mm, como se muestra en Fig. 5b. Estos especímenes fueron sometidos a carga cortante y de compresión simultánea, utilizando un protocolo de desplazamiento sinusoidal a diferentes niveles de deformación γ aproximados de 38%, 56%, 88%, 117%, 146% y 175%, Fig. 6. A partir de este ensayo se determinó el comportamiento histerético de los prototipos, como se muestra en la Fig. 7. Adicionalmente, en la Fig. 8 se presenta el comportamiento del módulo de corte G para los diferentes niveles de deformación, siendo indicadores importantes el G_{20} y el G_{100} en la retroalimentación durante el proceso de diseño de los especímenes, según lo planteado por [38].

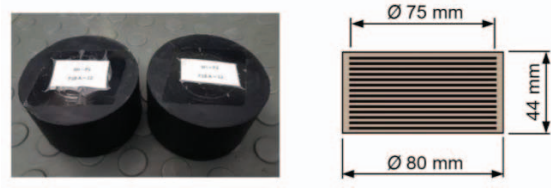


Fig. 7 a) *Probetas experimentales de Aisladores elastómericos no-conectados,* ***b)*** *Sección transversal esquemática de la probeta de los Aisladores.*

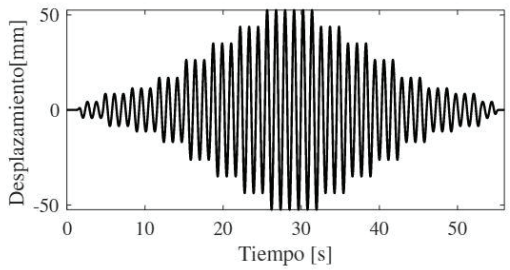


Fig. 8 *Protocolo de desplazamiento aplicado a las probetas de Aisladores elastómericos no- conectados*

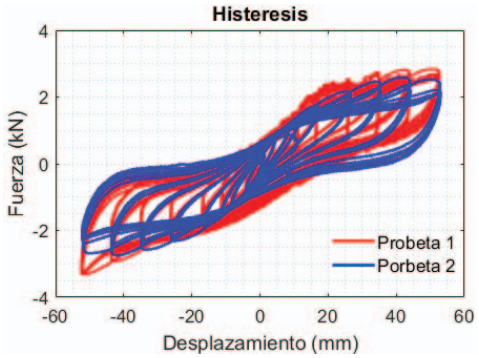


Fig. 5 *Lazos histeréticos de las probetas experimentales de Aisladores elastómericos no-conectados*

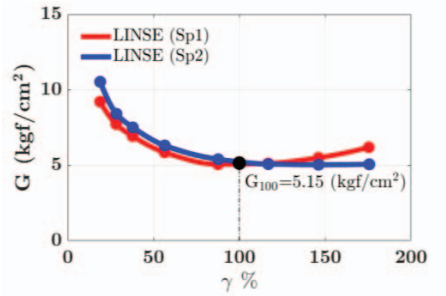


Fig. 6 *Curva experimental para el Modulo de corte G*

D. Sistema de Transferencia (ST)

Los *ST* son los encargados, en las SHTR, de transmitir físicamente la respuesta de la subestructura numérica a la subestructura experimental y, mediante el sistema de adquisición, capturar su respuesta para retroalimentar, en cada paso de tiempo Δt, al componente numérico. Con el fin de determinar la respuesta dinámica de la estructura de MDCR aislada, mediante la técnica de SHTR, donde el componente numérico corresponde a la edificación con MDCR y el componente experimental al sistema de aislamiento representado por aisladores elastómericos no-conectados a escala; se construyó un marco experimental para el ensayo de los especímenes experimentales con la capacidad de permitir tanto el acoplamiento de cargas horizontales como verticales, de forma simultáneamente. En la Fig. 9a se aprecia le marco construido, conformado por cuatro columnas metálicas rectangulares de 150x50x5 mm, en su sección transversal, conectadas por ángulos de 100x50x10mm y ancladas en la base. El marco experimental en funcionamiento se muestra en Fig. 9b, donde se aprecia el volcamiento del Aislador producto del efecto Rocking [36]. El marco experimental de ensayo se limitó a niveles bajos de capacidad debido al potencial hidráulico disponible para este tipo de ensayo.

El Sistema de Transferencia Horizontal (STH) es el encargado de replicar físicamente el comportamiento calculado por la SN. Para este caso, la respuesta numérica replicada corresponde al GDL de la interfaz entre el sistema de aislamiento sísmico y la edificación de MDCR. El STH utilizado en esta investigación corresponde a la mesa vibratoria (ST) de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

de la Universidad del Valle, compuesta por una placa de aluminio de 1.1mx1.5m guiada por rieles lineales de baja fricción que se conecta a un actuador hidráulico (AH) de 45 kN. El AH tiene acopladas dos Servo-válvulas con capacidad de 15 gpm, cada una, y conectadas a un potencial hidráulico de hasta 15.5 gpm. Adicionalmente, posee un transductor diferencial variable lineal (LVDT) interno que permite conocer la posición del vástago. La planta G_{HA} identificada para este sistema corresponde a la mostrada en (5), la cual se determinó a partir de ensayos de barridos de frecuencia de 0.1-20 Hz, con una duración de 250 s y amplitudes constantes de 0.5, 1.0, 3.0 y 5.0 mm; encontrando un sistema continuo con un polo en el origen, una ganancia nominal de 14.0 y un retardo en el tiempo de 33 ms.

$$G_{HA} = \frac{14}{s} e^{-0.033s} \quad (5)$$

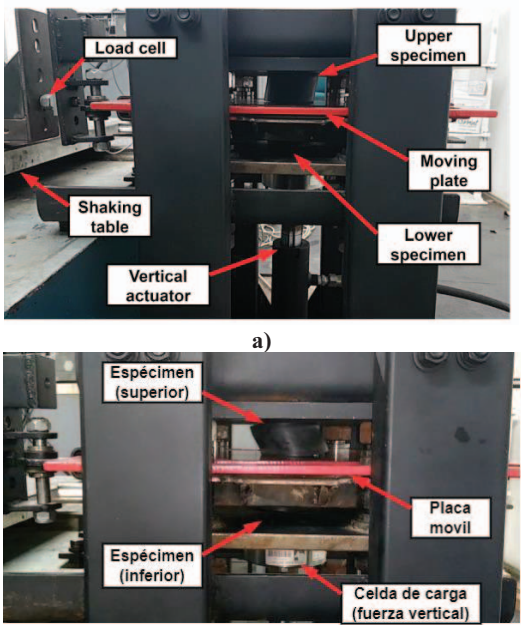


Fig. 10 a) *Marco experimental en Laboratorio de Ingeniería sísmica y Estructural – Universidad del Valle,* ***b)*** *Estado de deformación horizontal de probetas de aisladores sísmicos elastómericos no-conectados*

El STH se encuentra implementada con un controlador robusto tipo H_∞ de seguimiento por desplazamiento, implementando un Filtro de *Kalman* con el fin de ayudar a reducir el ruido del LVDT y estabilizar en gran medida la SHTR, como se muestra en la Fig. 10. Este controlador fue diseñado bajo los lineamientos de implementación de la función *hinfstruc* de Matlab [41].

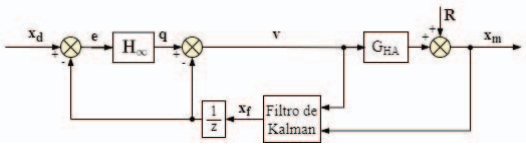


Fig. 11 *Esquema de control del Sistema de transferencia Horizontal (STH)*

Con el fin de simular la condición de carga vertical a la cual son sometidos los aisladores, en estado operacional, se implementó un Sistema de Transferencia Vertical (STV) compuesto por una Unidad de potencia Hidráulica Portátil (UPH) y un actuador hidráulico con una celda de carga Omega LPCH-5-M12, la cual permite medir la fuerza de compresión a la cual son sometidos los especímenes, Fig. 9. Debido al efecto *Roll-Out* o de volcamiento, producto de la dinámica de los aisladores no conectados, se desarrolló de un sistema de control del STV con el objetivo de sostener una carga constante bajo la deformación vertical variable a diferentes niveles de deformación lateral. El sistema de control del STV es de seguimiento de Fuerza compuesto de tres partes, Fig. 11. El primer componente es un *feedforward* lineal $aN_0 + b$. Debido a la condición no balanceada del cilindro, el segundo término se conforma de una constante dependiente del comportamiento de carga o descarga del mismo. El ultimo componente lo constituye un controlador clásico Proporcional-Integral PI, con sus respectivas constantes K_p y K_I.

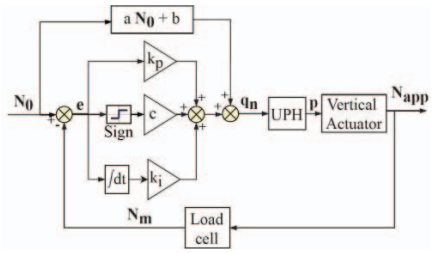


Fig. 9 *Esquema de control del Sistema de Transferencia Vertical*

III. RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICACIÓN CON MDCR AISLADA

Se realizaron cuatro SHTR bajo diferentes excitaciones sísmicas, correspondientes a los sismos de El Centro (USA 1940), Kobe (Japón 1995), Loma Prieta (USA 1989) y Morgan (USA 1984); con una amplitud máxima de 6.80 m/s^2 (0.70 g), Fig. 12.

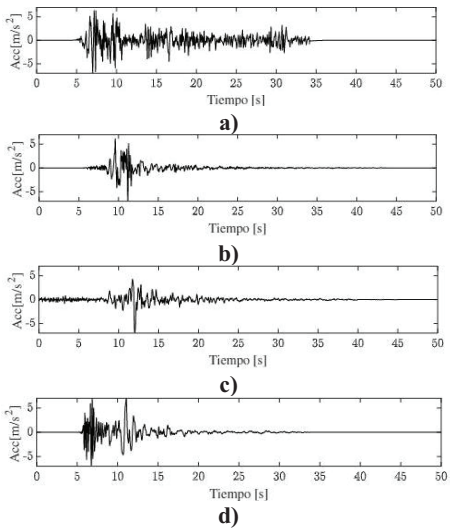


Fig. 12 *Excitaciones sísmicas* ***a)*** *El Centro,* ***b)*** *Kobe,* ***c)*** *Loma Prieta y* ***d)*** *Morgan.*

Para el desarrollo de la SHTR de la edificación de MDCR aislada se interconectaron la subestructura numérica, la subestructura experimental y los sistemas de transferencia, como se encuentra esquematizado en la Fig. 2. En este esquema se observa como la SN es sometida a una excitación en la base $\ddot{a}_g$ y su respuesta en desplazamiento $U_{i,d}$ es escalada a una tasa $1/F_H$, según el factor de forma calculado con anterioridad. Esta señal escalada $U^*_{i,d}$ es la referencia de seguimiento que reproduce el STH, la cual lo replica en un desplazamiento $U^*_{i,m}$ mediante el acoplamiento al marco experimental de prueba que lo transmite finalmente a los aisladores elastómericos no-conectados. A su vez, el STV aplica una carga axial de forma constante de 19 kN, correspondiente a las fuerzas gravitatorias de la edificación escaladas N_m al marco experimental. La fuerza de reacción al desplazamiento horizontal ejercida por los dos aisladores F^*_m es medida por la celda de carga horizontal, escalada en forma F_H y rigidez F_R; y multiplicar por la cantidad de aisladores N_{ISO} que conforman el sistema de aislamiento completo para obtener así la fuerza de retroalimentación F_{feed} de la SN y cerrar el lazo. Lo anterior se realiza en cada paso de tiempo Δt a una frecuencia de muestreo de 1024 Hz. Esto permitió determinar el comportamiento del sistema de aislamiento y las repuestas de la superestructura durante los cuatro eventos sísmicos planteado, Fig. 13-14.

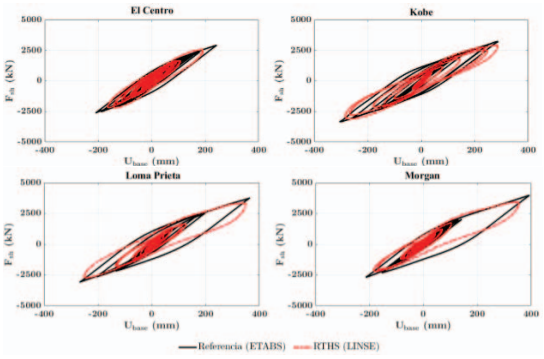


Fig. 13 *Respuesta dinámica del Sistema de aislamiento de la edificación de MDCR bajo los eventos sísmicos de El Centro, Kobe, Loma Prieta y Morgan*

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se diseñaron 12 aisladores elastómericos circulares no-conectados según los parámetros estipulados por la FEMA-450 para la estructura de MDCR. En primer lugar, se comprobó que el sistema de aislamiento sísmico aumentó el periodo fundamental de la estructura de 0.22 Hz a 1.91 Hz alejándolo de la meseta de Pseudo-aceleraciones máximas del espectro de diseño de la micro zona No.1 de Santiago de Cali. Posteriormente, los aisladores elastómericos se emplearon como subestructura experimental en las SHTR; su diseño y construcción fueron escalado de acuerdo a las limitaciones de capacidad del marco de pruebas de aisladores. Con base en lo anterior, se construyeron dos probetas experimentales, las cuales se caracterizaron dinámicamente, y se comprobó su correspondencia con el modelo numérico planteado en ETABS para deformaciones cercanas al 100% (Nivel de diseño); y discrepancias a bajas deformaciones debido a razones de amortiguamiento de 4.0% en los aisladores numéricos y 10.0% en las probetas experimentales. Se realizaron pruebas de SHTR de la edificación aislada de MDCR bajo cuatro eventos sísmicos: El Centro, Kobe, Loma Prieta y Morgan; en los cuales se evidenció una reducción promedio en derivas de piso de la estructura del 64.1%, 71.9%, 45.6% y 78.7%, respectivamente, bajo la acción del sistema de aislamiento comparado con la estructura con base rígida evaluada en ETABS19. Validando así la efectividad de las SHTR para la evaluación del comportamiento dinámico real de sistemas de aislamiento en la base y su incidencia en la disminución de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones con MDCR del Sistema Industrializado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto de Investigación: "Simulaciones híbridas en tiempo real: una alternativa confiable, rápida y económica para la evaluación de estructuras resilientes", en el marco del programa: "Tecnologías emergentes para la mitigación de riesgo sísmico de infraestructura civil", CT 463-2020. Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Universidad del Valle y al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias), entidad que financia el programa.

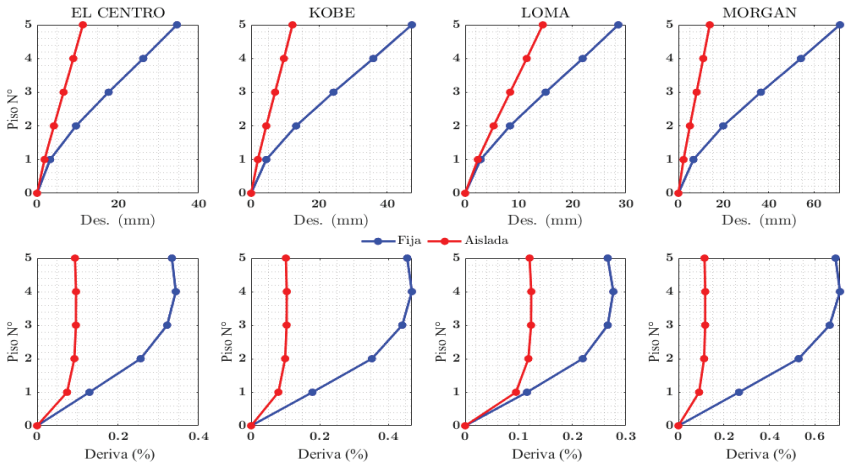


Fig. 14 Respuestas de superestructura; Superior: Desplazamientos Máximos; Inferior: Derivas de piso.

REFERENCIAS

[1] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente: NSR-10. Imprenta Nacional, 2010.

[2] S. Dyke et al., "Vision 2020: An Open Space Technology Workshop on the Future of Earthquake Engineering," St. Louis, Missouri, USA, 2010.

[3] Ortega, Roger et al. Evaluation and fitting of a numerical model for reinforced concrete thin walls through experimental results of monotonic and cyclic loading tests. Latin American Journal of Solids and Structures [online]. 2021, v. 18, n. 05.

[4] Construdata. Los materiales de construcción. Retrieved from http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp. 2013

[5] Sánchez, J. C., & Arteta, C. A. Caracterización Estadística de Edificios de Muros Delgados en Concreto Reforzado para Zonas de Amenaza Sísmica Alta. In VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Barranquilla. Colombia. 2017

[6] Argos. Ficha Técnica. Concreto para Sistema Industrializado. Santa Fé de Bogota. Colombia. 2018

[7] Palomino, C. Buenas prácticas en el diseño de vivienda industrializada. Noticreto, 152. Ene-, 12–18. 2019

[8] Camacol. Colombia construcción en cifras. Retrieved from https://camacol.co/informacion-economica/construccion-en-cifras. 2019

[9] Abdullah, S. A., & Wallace, J. W. Drift Capacity of RC Structural Walls with Special Boundary Elements. ACI Structural Journal, 116-S17(January), 183–194. 2019

[10] Almeida, J., Prodan, O., Rosso, A., & Beyer, K. Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. Earthquake Spectra, 33(1), 323–345. 2016. https://doi.org/10.1193/101915EQS154DP

[11] Alarcon, C., Hube, M. A., & de la Llera, J. C. (2014). Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries. Engineering Structures, 73, 13–23. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.047

[12] Wallace, J. W., Massone, L. M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C., & Moehle, J. Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. Earthquake Spectra, 28 (S1), S281–S299. 2012. https://doi.org/10.1193/1.4000047

[13] 11- Almeida, J., Prodan, O., Rosso, A., & Beyer, K. (2016). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. Earthquake Spectra, 33(1), 323–345. https://doi.org/10.1193/101915EQS154DP

[14] Parra, P. F., & Moehle, J. P. Stability of Slender Wall Boundaries Subjected to Earthquake Loading. ACI Structural Journal, 114 (6), 1627–1636. 2017. https://doi.org/10.14359/516851700836

[15] Carrillo, J., Diaz, C., & Arteta, C. A. Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá Colombia. Construction and Building Materials, 195, 352–362. 2019

[16] R. Dey and P. Saha, "Seismic Response Control of Smart Base-Isolated Benchmark Building Using Hybrid Control Strategy (Viscous Fluid Damper with MR Damper)," Recent Advances in Structural Engineering, vol. 2. Springer Singapore, 2019

[17] N. Nakata et al., "Hybrid Simulation Primer and Dictionary," Hybrid Simul. Task Force, no. Cmmi, 2014.

[18] A. Najafi and B. F. Spencer, "Validation Of Model-based Real-time Hybrid Simulation For A Lightly-damped And Highly-nonlinear Structural System," J. Appl. Comput. Mech., vol. 7, pp. 1252–1265, 2021, doi: 10.22055/JACM.2020.32584.2039.

[19] K. Takanashi and M. Nakashima, "Japanese Activities on On‐Line Testing," J. Eng. Mech., vol. 113, no. 7, pp. 1014‐1032, 1987, doi: 10.1061/(asce)0733-9399(1987)113:7(1014).

[20] A. P. Darby, A. Blakeborough, and M. S. Williams, "Real-Time Substructure Tests Using Hydraulic Actuator," J. Eng. Mech., vol. 125, no. 10, pp. 1133–1139, 1999, doi: 10.1061/(asce)0733-9399(1999)125:10(1133).

[21] M. Nakashima, H. Kato, and E. Takaoka, "Development of real‐time pseudo dynamic testing," Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 21, no. 1, pp. 79‐92, 1992, doi: 10.1002/eqe.4290210106

[22] A. Maghareh et al., "A Reflective Framework for Performance Management (REFORM) of Real-Time Hybrid Simulation," Front. Built Environ., vol. 6, no. September, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.568742.

[23] G. A. Fermandois and B. F. Spencer, "Model-based framework for multi-axial real-time hybrid simulation testing," Earthq. Eng. Eng. Vib., vol. 16, no. 4, pp. 671–691, 2017, doi: 10.1007/s11803-017-0407-8.

[24] X. Ning, Z. Wang, H. Zhou, B. Wu, Y. Ding, and B. Xu, "Robust actuator dynamics compensation method for real-time hybrid simulation," Mech. Syst. Signal Process., vol. 131, pp. 49–70, 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.05.038.

[25] X. Shao and C. Griffith, "An overview of hybrid simulation implementations in NEES projects," Eng. Struct., vol. 56, pp. 1439–1451, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.07.008.

[26] S. H. Eem, H. J. Jung, and J. H. Koo, "Seismic performance evaluation of an MR elastomer-based smart base isolation system using real-time hybrid simulation," Smart Mater. Struct., vol. 22, no. 5, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/5/055003.

[27] M. Nakashima, H. Kato, and E. Takaoka, "Development of real‐time pseudo dynamic testing," Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 21, no. 1, pp. 79‐92, 1992, doi: 10.1002/eqe.4290210106.

[28] K. Takanashi, K. Udagawa, M. Seki, T. Okada, and H. Tanaka, "Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system," Bull. Earthq. Resist. Struct. Res. Cent., vol. 8, pp. 1–17, 1975.

[29] S. A. Mahin, "Pseudodynamic test," vol. 115, no. 8, pp. 2113–2128, 1990.

[30] C. E. Silva, D. Gomez, A. Maghareh, S. J. Dyke, and B. F. Spencer, "Benchmark control problem for real-time hybrid simulation," Mech. Syst. Signal Process., vol. 135, p. 106381, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106381.

[31] S. Strano and M. Terzo, "Implementation and validation of a hybrid testing procedure for base-isolated structures," Lect. Notes Eng. Comput. Sci., vol. 2224, pp. 647–651, 2016.

[32] X. Shao, A. M. Reinhorn, and M. V. Sivaselvan, "Real-Time Hybrid Simulation Using Shake Tables and Dynamic Actuators," J. Struct. Eng., vol. 137, no. 7, pp. 748–760, 2011, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000314.

[33] T. Tidwell, X. Gao, H. M. Huang, C. Lu, S. Dyke, and C. Gill, "Towards configurable real-time hybrid structural testing: A cyber-physical systems approach," Proc. 2009 IEEE Int. Symp. Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distrib. Comput. ISORC 2009, no. 1, pp. 37–44, 2009, doi: 10.1109/ISORC.2009.41

[34] R. Christenson, Y. Z. Lin, A. Emmons, and B. Bass, "Large-Scale Experimental Verification of Semiactive Control through Real-Time Hybrid Simulation," J. Struct. Eng., vol. 134, no. 4, pp. 522–534, 2008, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:4(522)

[35] D. Gomez, S. J. Dyke, and A. Maghareh, "Enabling role of hybrid simulation across NEES in advancing earthquake engineering," Smart Struct. Syst., vol. 15, no. 3, pp. 913–929, 2015, doi: 10.12989/sss.2015.15.3.913.

[36] Riascos, C, Klopov, S, Losanno, D, Marulanda, J, Thomson, P. Real-time hybrid simulations including rocking effects: The case of a frame-structure with unbounded elastomeric isolators. Struct Control Health Monit. 2022; e2984. doi:10.1002/stc.2984

[37] B.S.S.C.B. of the National Institute of Building Sciences, Fema 450 edition recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures p2, FEMA450.

[38] I. Madera, Desarrollo tecnológico de un aislador sísmico de bajo costo para edificaciones bajas, Tesis doctoral, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

[39] I.C. de Geología y Minería (INGEOMINAS), D.A. de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), Informe 5.2 respuesta sismica., Microzonificación Sísmica Cali 1.

[40] i. CSi Computer structures, Csi analysis reference manual for sap2000, etabs, safe and csibridge

[41] C. Riascos, P. Thomson, D.S. J., Performance evaluation of a non-linear tuned mass damper through real-time hybrid simulation., Inge CUC 15.2 (2019) 11–22.

Correlation between characteristic properties and chloride content in existing reinforced concrete structures with different levels of exposure in Panama

Correlación entre propiedades características y el contenido de cloruro en estructuras existentes de concreto reforzado con distintos grados de exposición en la República de Panamá

Javier Lozano
Facultad de Ingeniería Civil -
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
jesus.serrano@utp.ac.pa

Jesús Serrano
Facultad de Ingeniería Civil -
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
jesus.serrano@utp.ac.pa

Ramiro Vargas*
Facultad de Ingeniería Civil -
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ramiro.vargas@utp.ac.pa

Abstract— **Structural pathology attempts to assess the actual state of a structure to predict its behavior and lifespan, considering several factors, including weathering. Chemical exposure to the chloride ion is known as the worst threat to the composition of reinforced concrete structures, as its presence exponentially accelerates the corrosive phenomenon. The objective of this research is to correlate the characteristic properties in cores extracted from reinforced concrete structures throughout the country with the chloride content, as well as with the level of exposure to environmental chloride, determined in each of the chloride capturing stations, by using the wet candle method. The results obtained indicate that all stations installed nationwide presented an exposure category S1 (according to ISO 9223). Similarly, a marked inversely proportional relationship was also observed between the distance to the sea of the structures with the chloride content in the samples and with the level of environmental exposure. Furthermore, it was found that the age of the structure can be used as an indicator in the performance of reinforced concrete structures. For subsequent studies, it is recommended to evaluate the use of technological methods and tools that facilitate collection and chemical analysis of samples, including a prolonged record of relative humidity, and increasing the study period to at least one year, to analyze chloride levels as a function of time and weather conditions.**

Keywords— environmental chloride, exposure category, reinforced concrete, structural pathology, wet candle.

Resumen — **La patología estructural intenta evaluar el estado real de una estructura para predecir su comportamiento y vida útil, tomando en cuenta diversos factores, entre ellos el intemperismo. La exposición química al ion cloruro es conocida como la mayor amenaza a la composición de estructuras de concreto reforzado, ya que su presencia acelera exponencialmente el fenómeno corrosivo. El objetivo de esta investigación es el de correlacionar las propiedades características en núcleos extraídos de estructuras de concreto reforzado a nivel nacional con el contenido de cloruro, así como con el grado de exposición al cloruro ambiental, determinado en cada una de las estaciones de captación de cloruro, mediante la aplicación del método de la vela húmeda. Los resultados obtenidos indican que todas las estaciones instaladas a nivel nacional presentaron una categoría de exposición S1 (según la norma ISO 9223). De igual forma, también se observó una marcada relación inversamente proporcional entre la distancia al mar de las estructuras con el contenido de cloruro en las muestras y con el grado de exposición ambiental. Adicionalmente, se pudo constatar que la edad de la estructura se puede utilizar como indicador en el desempeño de las estructuras de concreto reforzado. Para estudios posteriores, se recomienda la evaluación del uso de métodos y herramientas tecnológicas que faciliten la captación, recolección y análisis químico de muestras, incluyendo un registro prolongado de humedad relativa y aumentando el periodo de estudio a mínimo un año, para analizar los niveles de cloruro en función del tiempo y las incidencias climáticas.**

Palabras claves — categoría de exposición, cloruro ambiental, concreto reforzado, patología estructural, vela húmeda.

I. INFLUENCIA DEL AMBIENTE EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Las estructuras de concreto reforzado funcionan desde su punto más esencial como una mezcla compuesta de concreto y acero, diseñada específicamente para que en conjunto desarrollen un comportamiento que resista esfuerzos mecánicos a comprensión y tensión de manera efectiva [1]. La durabilidad de este material compuesto depende de múltiples factores que actúan a lo largo del tiempo, de los cuales uno de los principales es la exposición ambiental del entorno circundante.

Los ataques climáticos a la integridad de este tipo de estructuras han sido objeto de estudios por un largo tiempo, dando paso a lo que se conoce como patología estructural: estudios experimentales que intentan evaluar el estado de vitalidad de una estructura con el paso del tiempo, para predecir su comportamiento y vida útil; tomando en cuenta factores como el intemperismo, exposición química, fatiga

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00030

por utilización, entre otros [2]. La exposición química al ion cloruro es conocida como la mayor amenaza a la composición de las estructuras de concreto reforzado, debido a que su presencia acelera exponencialmente el fenómeno conocido como corrosión [3].

Numerosas técnicas han sido desarrolladas con la finalidad de analizar este fenómeno: su origen, avance y de qué manera afecta su presencia a la vida útil de una estructura de concreto reforzado [4]. Estos ataques químicos suceden en su mayoría en locaciones con alto nivel de salinidad y Panamá, por ser un país costero, presenta una geografía clave para el estudio patológico del concreto reforzado; siendo el primer punto de este estudio el análisis de concentración de ion cloruro a la que se ven expuestas las estructuras.

En esta investigación se ejecuta un estudio patológico, donde las pruebas destructivas y no destructivas se emplean en estructuras de concreto reforzado pertenecientes a la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) a nivel nacional, para determinar las propiedades mecánicas características del concreto. Adicionalmente, mediante el método de la vela húmeda en estaciones de monitoreo ubicadas en puntos geográficos claves, se permite la correlación entre las propiedades mecánicas y químicas del concreto y el grado de exposición de las estructuras estudiadas.

Aplicación Práctica de la Patología Estructural

La utilidad y funcionalidad de una estructura de concreto reforzado está intrínsecamente definida por sus propiedades características, entre ellas: la edad de la estructura, resistencia a la compresión, contenido de cemento y de cloruro, pH del concreto, entre otras propiedades mecánicas y fisicoquímicas.

La importancia de la parte práctica de la Patología Estructural radica en obtener suficientes datos y, sobre todo, lo más importante, que sean confiables y tengan validez para su futuro uso como base estadística.

La Patología estructural, en función de proveer un diagnóstico del estado real de la estructura lo más exacto y fiable posible, debe aplicarse con parámetros estadísticos y lineamientos establecidos por códigos y normativas que estandarizan los procedimientos correctos en la ejecución de pruebas y ensayos (destructivos, no destructivos, in situ y en laboratorio) para la obtención de la mayor cantidad de información posible. Obtenida y analizada dicha información, y dictado un diagnóstico, se pueden remediar y corregir las afecciones de las estructuras con efectivas soluciones constructivas, para asegurar tanto la durabilidad como la funcionalidad de estas. De igual forma, mediante estas soluciones se mantiene la seguridad y el bienestar de los usuarios [5].

Esta investigación inicia con la recolección de data existente de patologías estructurales en diversos puntos de la ciudad de Panamá y en la provincia de Chiriquí, realizadas por el Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). Mediante la extracción de muestras de concreto se analizan los resultados, correlacionando las variables estudiadas y obtenidas dentro de la investigación. De esta manera, mediante la aplicación práctica y la ejecución de métodos, pruebas y ensayos de laboratorio se lleva a cabo un estudio de patología estructural integral.

La siguiente etapa consiste en la extracción de núcleos en distintas áreas geográficas de la República de Panamá. La UTP cuenta con instalaciones y centros regionales, específicamente en la Ciudad de Panamá (Campus Central Víctor Levi Sasso, Extensión de Tocumen y Howard); y en los centros regionales: Azuero, Bocas del Toro, Coclé, Colón, Chiriquí, Panamá Oeste y Veraguas, a lo largo del territorio de la República de Panamá. Cada una de estas sedes consta de edificios de distintas edades.

Aprovechando la variada información que se puede obtener de todas estas estructuras y la injerencia de la universidad, se facilita la realización de trabajos de extracción de núcleos dentro de las instalaciones, para así proceder a realizar un análisis completo de los mismos.

Adicionalmente, como etapa simultánea a las extracciones, la instalación de estaciones para medir el cloruro ambiental mediante el método de la vela húmeda en cada sitio de estudio, permite realizar un monitoreo y análisis de data durante un periodo mínimo de 6 meses. Con la obtención y procesamiento de la data se determina, dependiendo del contenido de cloruro ambiental, el tipo de exposición a la que las estructuras están sometidas. Finalmente, un análisis profundo permite correlacionar la concentración del cloruro ambiental con las propiedades características del concreto reforzado: edad de las estructuras, distancia al mar, resistencia a la compresión y contenido de cloruro.

II. EXPERIMENTACIÓN

A. Captación de Cloruro Ambiental - Método de la Vela Húmeda

El estudio del cloruro ambiental mediante el método de la vela húmeda consta de dos etapas, la cuales consisten en la captación de los iones cloruro en el ambiente y luego, el análisis respectivo. El monitoreo se realizó mensualmente a las muestras colocadas en las estaciones a nivel nacional.

*1) **Captación*** [6]

El captador de cloruros consiste en una vela o cilindro de PVC con un área de 8.6014×10^{-3} m^2, que está recubierto con tela o gasa (ver Fig. 1). Este captador se coloca en una botella que contiene 200 mL de una solución al 20% de glicerina en agua destilada, que la mantiene siempre húmeda por capilaridad (de allí el nombre "vela húmeda"). La vela se lleva a exposición por un periodo de 30 días y el resultado final se reporta en mg Cl^- /m^2 / día.

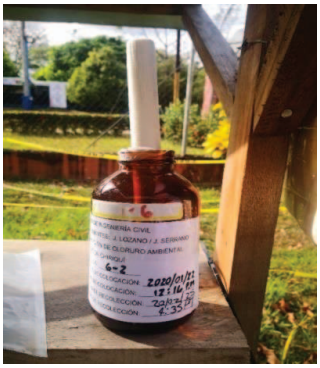


Fig. 1. Vela húmeda colocada para captación de cloruro ambiental.

2) ***Análisis*** [7]

a) Se retira la gasa y con la solución de glicerina se lleva a filtración por succión usando papel filtro N°42. Se lava con agua destilada y se lleva a un volumen de 250 mL.

b) Se toma una alícuota de 100 mL de esta solución y se ajusta el pH entre 7-10.

c) Se adiciona 1 mL de solución indicadora de cromato de potasio (K2CrO4).

d) Se valora con nitrato de plata ($AgNO_3$).

B. Proceso de Filtración de Soluciones Acuosas

La preparación y filtración de las muestras obtenidas es un proceso que se debe llevar a cabo con cuidado y siguiendo pasos específicos:

EQUIPO Y MATERIALES:

1) *Muestra Recolectada*
2) *Embudo BüchnerMatraz Kitasato*
3) *Bomba de vacío de laboratorio*
4) *Papel filtrante cualitativo*
5) *Cilindro graduado*
6) *Pinza*
7) *Matraz Erlenmeyer*
8) *Parafina*
9) *Agua destilada*
10) *Papel toalla*

PROCEDIMIENTO:

- Utilizando guantes se desenvuelve la gasa del tubo sobre la mesa limpia cubierta con papel toalla, o dentro de un vaso químico limpio.
- Se coloca la gasa húmeda dentro de la botella ámbar junto con la muestra líquida, y se agita ligeramente de manera circular.
- Se prepara el mecanismo de filtración. Para esto se enjuagan con agua destilada todos los equipos. Se coloca el embudo Büchner sobre el matraz Kitasato para que cierren herméticamente.
- Sobre el filtro del embudo se coloca el papel filtrante para que cubra perfectamente los orificios. Se ajusta la manguera de la bomba a la boquilla del matraz y se enciende.
- Se hace pasar la totalidad de la muestra de la botella por el mecanismo de filtración. Con la ayuda de una pinza se toma la gasa mojada y se exprime la muestra absorbida por la tela, haciendo pasar esta por el filtro (ver Fig. 2). Se apaga la bomba.
- Tomando el matraz con precaución se vierte la mezcla filtrada a un cilindro graduado, se toma la medida de la cantidad de muestra y se anota.
- Se vierte el contenido del cilindro a un matraz Erlenmeyer tapándolo herméticamente con la ayuda de parafina, y se almacena debidamente rotulado hasta el momento de su titulación.

C. Determinación de Concentración de Cloruro por Titulación Simple

MATERIALES Y REACTIVOS:

1) *Cilindro graduado*
2) *Matraz Erlenmeyer*
3) *Pipeta de 5 mL*
4) *Bureta de 50 mL*
5) *Cromato de potasio (K_2CrO_4)*
6) *Nitrato de plata ($AgNO_3$)*

PROCEDIMIENTO

- Utilizando un cilindro graduado se separan 100 mL de la muestra a analizar y se depositan en un matraz Erlenmeyer. A los 100 mL de muestra se le añade 1 mL de la solución indicadora de cromato de potasio (K_2CrO_4), con la ayuda de una pipeta para mayor exactitud.
- Para preparar la bureta se llena con nitrato de plata ($AgNO_3$), el cual tendrá la función de reactivo titulante. Se anota la lectura inicial y se procede a titular permitiendo la caída de la solución titulante, hasta que la muestra a analizar cambie de color amarillo a naranja rojizo. Se anota la lectura.

Fig. 2. Filtración de muestra de cloruro ambiental recolectada.

D. Extracción de Núcleos de Concreto de Estructuras Existentes según ASTM C42

El proceso de extracción de núcleos de concreto, llevado a cabo según norma de ensayo ASTM C 42 [8], fue ejecutado en edificaciones pertenecientes a la Universidad Tecnológica de Panamá en las provincias de Panamá y Colón, específicamente en los siguientes tres puntos geográficos: Extensión de Tocumen, Campus Central Víctor Levi Sasso y Centro Regional de Colón. Como primer paso se procedió a realizar la detección de acero en la respectiva estructura a perforar y analizar, para determinar la configuración del refuerzo existente. Mediante la medición y marcación en la

columna, se evita que al momento de la extracción se entre en contacto con el acero de refuerzo.

Una vez establecida y marcada la configuración del acero en la superficie, se procede a la instalación y anclaje del taladro con broca punta de diamante para la extracción.

Una vez anclada la base se coloca, se monta y se ajusta el taladro sobre esta. En este caso es una extracción húmeda, debido al sistema hidráulico de enfriamiento del taladro. Cuando se llega a la profundidad deseada, se procede al desmontaje del taladro y a la extracción del núcleo (ver Fig. 3).

Una vez el núcleo es extraído, primeramente, se sella la perforación con mortero de alta resistencia, dejando la superficie con un acabado liso. Mientras se realiza esto, se esperan unos minutos hasta que el núcleo esté superficialmente seco, se identifica utilizando la nomenclatura establecida previamente y se coloca herméticamente dentro de una bolsa plástica, en la cual se le anotan los siguientes datos:

1) Identificación de núcleo (según nomenclatura establecida)
2) Fecha de extracción
3) HI – Hora inicio de extracción
4) HF – hora final de extracción
5) HB – hora de introducción a la bolsa plástica

Identificación de núcleos:
Nomenclatura: "*TIC - COL - I - 02*"
TIC - *Tesis de Ingeniería Civil*
COL - *Centro Regional de Colón*
I - *Edificio de donde se extrajo el núcleo (según plano)*
02 - *Número de núcleo extraído en el edificio (3 extracciones por edificio)*

Fig. 3. Extracción de núcleo.

E. Compresión Mecánica de Especímenes de Concreto según ASTM C39

Una vez extraídos, el proceso de compresión mecánica de los núcleos se realizó siguiendo los lineamientos de la norma de ensayo ASTM C39 [9]. Se le colocó la dirección de extracción, seguidamente de la marcación y medición del núcleo, asegurando una relación L/D (largo/diámetro) de 2 para la ejecución del ensayo de compresión. Adicionalmente, en el extremo de la superficie expuesta del núcleo se midieron y marcaron pastillas de 0.5 pulgadas de espesor. Seguidamente, se realizó el corte del núcleo, tanto de las pastillas como del tramo a comprimir.

Luego de ser ejecutados todos los cortes en el núcleo, se midió el largo de este en tres posiciones, espaciadas regularmente alrededor de la circunferencia y se calculó el promedio (al milímetro más cercano). De igual manera, se mide el diámetro en dos posiciones perpendiculares entre sí y se calcula el promedio (al 0.20 mm más cercano). Se pesó el núcleo (en kilogramos), se llenó el formato técnico de ensayo con estos datos, se volvieron a colocar en bolsas plásticas y finalmente, se calculó la relación L/D (largo/diámetro). Si esta relación es menor que 2, el resultado del esfuerzo de compresión se multiplica por un factor de corrección, establecido en la norma ASTM C42. Previamente al ensayo de resistencia a la compresión, a todo núcleo se le colocó un refrentado adherido.

III. RESULTADOS OBTENIDOS

A. Ubicación y distancia al mar de las estaciones de captación de cloruro ambiental instaladas

A través del uso de herramientas tecnológicas (Google Earth Pro y ArcGIS Pro) se determinaron las coordenadas de latitud y longitud de cada una de las estaciones de captación de cloruro ambiental instaladas a nivel nacional y así, con esta información, calcular y trazar la distancia aproximada al mar, tanto de las estaciones como de las estructuras estudiadas (ver Fig. 4). La Tabla I contiene las coordenadas de latitud y longitud de cada estación de captación de cloruro ambiental, y la distancia aproximada al mar. Utilizando una escala de color de rojo a verde se organizaron los datos para demostrar visualmente las estaciones más críticas en cuanto a proximidad al mar, siendo rojo la más cercana.

Fig. 4. Ubicación a nivel nacional de estaciones de captación de cloruro ambiental instaladas.

TABLA I. COORDENADAS DE ESTACIONES Y DISTANCIA APROXIMADA AL MAR

Estación	Coordenadas		*Distancia aproximada al mar (m)*
	Latitud	*Longitud*	
Tocumen*	9°4'3.19" N	79°24'15.71" O	7 109
Campus*	9°1'27.24" N	79°31'52.69" O	6 795
Colón*	9°17'14.54" N	79°54'17.20" O	895

Estación	Coordenadas		*Distancia aproximada al mar (m)*
	Latitud	*Longitud*	
Howard	8°56'11.22" N	79°35'29.77" O	1 885
Panamá Oeste	8°51'44.52" N	79°48'14.94" O	9 388
Penonomé	8°29'17.92" N	80°19'42.40" O	22 226
Aguadulce	8°14'45.74" N	80°31'58.60" O	8 340
Azuero	7°55'43.35" N	80°24'56.87" O	8 093
Veraguas	8°4'31.54" N	80°56'4.26" O	21 707
Chiriquí	8°25'27.76" N	82°26'32.55" O	6 398
Bocas del Toro	9°25'19.85" N	82°31'24.18" O	9 652

* Puntos geográficos donde se realizaron extracciones de núcleos de concreto

B. Edad de las estructuras de concreto reforzado estudiadas

En la Tabla II se presenta el año de construcción y edad de las estructuras de concreto reforzado estudiadas. La parte superior de la tabla, remarcada en verde, contiene las sedes y respectivos edificios donde se ejecutaron las extracciones de núcleos, utilizando la identificación presentada en los planos. La parte inferior de la tabla, la cual no está remarcada, contiene el año de construcción y edad de edificios pertenecientes a centros regionales a nivel nacional, donde no se pudo llevar a cabo el proceso de extracción.

TABLA II. EDAD DE EDIFICIOS PERTENECIENTES A LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ DONDE SE REALIZARON PRUEBAS PATOLÓGICAS.

Edad de Edificios		
Sede/Edificio	***Año de Construcción***	***Edad***
*Tocumen / A, D, E, F	1981	38
*Colón / F, G, H	1919	100
*Colón / I	2004	15
*Campus / N°1	1998	21
*Campus / Postgrado	2003	16
*Campus / N°3	2009	10
*Campus / VIAD (Orillac)	1985	34
Aguadulce	2012	7
Azuero	1983	36
Bocas del Toro	1986	33
Chiriquí	1979	40
Panamá Oeste	1995	24
Penonomé	1982	37
Veraguas	1986	33

* Puntos geográficos donde se realizaron extracciones

C. Puntos de Extracción de Núcleos

En la Fig. 5 se muestran los puntos de extracción de núcleos de concreto, obtenidos de la sede de la UTP correspondiente a la Extensión de Tocumen (sector Pacífico de la ciudad de Panamá).

Fig. 5. Extracciones realizadas en Extensión de Tocumen.

Los tres puntos geográficos donde se efectuaron las extracciones de núcleos de concreto en estructuras de concreto reforzado fueron: Campus Central Víctor Levi Sasso y Extensión de Tocumen, en la ciudad de Panamá, y el Centro Regional de Colón, ubicado en el área de Fort Davis en dicha provincia. En cada instalación perteneciente a la Universidad Tecnológica de Panamá se extrajeron núcleos de cuatro (4) edificaciones diferentes, y en cada una de ellas se extrajeron tres (3) núcleos, dando un total de doce (12) núcleos por instalación. Se efectuaron 36 extracciones en total. En la Fig. 5 se presenta como ejemplo las extracciones realizadas en la Extensión de Tocumen. Mediante imágenes satelitales de las tres ubicaciones geográficas de estudio, se visualiza la ubicación exacta y distribución de los puntos de extracción y de la correspondiente estación de captación de cloruro ambiental.

D. Propiedades Mecánicas

Se determinaron las propiedades mecánicas de cada uno de los 36 núcleos extraídos, su resistencia a compresión, carga máxima y esfuerzo promedio. Es importante destacar que un total de 7 muestras no cumplieron con el requerimiento mínimo del ACI 318-19 para calificar como concreto de uso estructural (2500 psi), distribuidas como se observa en Fig. 6. Este gráfico incluye los resultados globales de resistencia a la compresión de las extracciones realizadas en el Campus Central Víctor Levi Sasso, Centro Regional de Colón y en la Extensión de Tocumen.

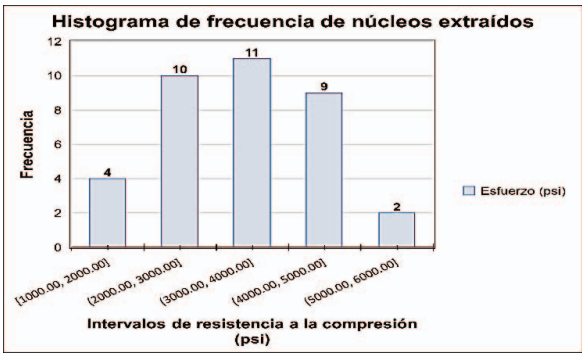


Fig. 6. Histograma de frecuencia de resistencia a compresión de núcleos.

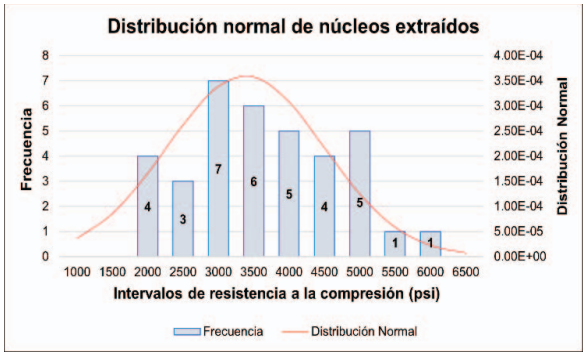


Fig. 7. Distribución normal de resistencia a la compresión de las muestras extraídas.

A través de histogramas de frecuencia, como el de la Fig. 6, se visualiza gráficamente cómo se distribuye el total de 36 núcleos extraídos en intervalos establecidos, según los resultados obtenidos de cada uno. El gráfico presenta la frecuencia de resultados de resistencia a la compresión de los núcleos en intervalos de 1000 psi, en un rango de 1000 psi a 6000 psi.

Para los resultados obtenidos de resistencia a la compresión el valor mínimo obtenido fue de 1576.56 psi y el máximo 5755.10 psi, el cálculo de la media de las muestras fue de 3382.88 psi y la desviación estándar de 1109.84 psi. La Fig. 7 contiene el gráfico del histograma de frecuencia en intervalos de resistencia a la compresión de 500 psi, en conjunto con los datos estadísticos calculados. De igual forma, se muestra la distribución normal del total de muestras analizadas.

E. Propiedades Químicas

En la Tabla III se muestra el ejemplo de un resumen de resultados del análisis de concentración de cloruros ambientales, obtenidos en una de las estaciones de captación de cloruro ambiental (Bocas del Toro). En esta tabla se listan los siguientes datos:

1) *Fecha de muestreo de las muestras a estudiar*
2) *Rotulación de la muestra*
3) *Volumen total en miligramos (mg) del cloruro encontrado en las muestras*
4) *Miligramos sobre metros cuadrados por día que se puede encontrar de cloruro en el área de estudio (mg Cl^- / m^2/día)*
5) *Categoría de exposición ambiental según la Norma ISO 9223*

Esta unidad estándar (mg Cl^- / m^2 / día) es la utilizada para representar la concentración de cloruro que se podría encontrar en un área específica durante un día de estudio.

CÁLCULOS

Para obtener los valores listados en la Tabla III fue necesario realizar los cálculos mostrados a continuación, utilizando los datos de la muestra 1.1 pertenecientes a la estación de Bocas del Toro.

TABLA III. RESUMEN DE PROPIEDADES QUÍMICAS RESULTANTES DEL ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE CLORURO AMBIENTAL EN LA ESTACIÓN DE BOCAS DEL TORO.

Estación Bocas del Toro				
Fecha de muestreo	***Muestra***	***Volumen Total (mg Cl^-)***	***mg Cl^- / (m2.d)***	***Categoría según ISO 9223***
14/09/2019	*Blanco	-	-	
14/09/2019	1-1	0.925	8.18	**S1**
14/09/2019	1-2	0.798	7.05	
12/10/2019	*Blanco	-	-	
12/10/2019	2-1	1.064	10.08	**S1**
12/10/2019	2-2	0.539	5.10	
12/11/2019	*Blanco	-	-	
12/11/2019	3-1	0.482	4.13	**S1**
12/11/2019	3-2	0.681	5.82	
16/12/2019	*Blanco	-	-	
16/12/2019	4-1	0.734	5.73	**S1**
16/12/2019	4-2	1.064	8.30	

* Muestra de control sin exposición ambiental

$$a = (V_b * N * 35450) / V_a \quad (1)$$

$$a = (0.3 * 0.05 * 35450) / 100$$

$$a = 5.32 \text{ mg/L}$$

En donde:
a = Alícuota de miligramos sobre litros encontrada en la muestra.
V_b = Volumen del blanco de calibración que fue consumido
N = Normalidad del nitrato de plata utilizado para la titulación
35450 = Factor de conversión relacionado con el peso atómico del cloro, utilizado para obtener las unidades en mg/L
V_a = Volumen de alícuota utilizado para realizar el procedimiento.

Una vez obtenida la alícuota de concentración de cloruro se procede a obtener el volumen total en mg de cloruro que fue encontrada en la muestra:

$$V = V_a * (V_t / 1000) \quad (2)$$

$$V = 12.41 * (174 / 1000)$$

$$V = 0.92 \text{ mg } Cl^-$$

En donde:
V = Volumen total en mg de cloruros en la muestra
V_t = Volumen total de muestra que fue recolectada in situ
1000 = Factor de conversión para obtener la unidad en mg

Finalmente, se procede a realizar el cálculo para obtener la concentración de cloruros en miligramos sobre metros cuadrados por día:

$$C = V / (A * 30) \quad (3)$$

$$C = 0.93 / (0.00376992 * 30)$$

$$C = 8.18 \text{ mg } Cl^- / m^2 / \text{día}$$

En donde:
C = Concentración de cloruros en miligramos sobre metros cuadrados por día
A = Área de contacto de la vela húmeda recolectora de cloruros suspendidos en el ambiente
30 = Factor de conversión de unidades según días de exposición

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN ESTABLECIDO EN LA NORMA ISO 9223 PARA LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS ENCONTRADOS EN EL AMBIENTE

- **S_0** para una concentración menor a 3 mg Cl^-/m^2 / día
- **S_1** para una concentración mayor que 3 pero menor que 60 mg Cl^-/m^2 / día
- **S_2** para una concentración mayor que 60 pero menor que 300 mg Cl^-/m^2 / día
- **S_3** para una concentración mayor que 300 pero menor que 1500 mg Cl^-/m^2 / día

F. Mapa de grado de exposición a nivel nacional

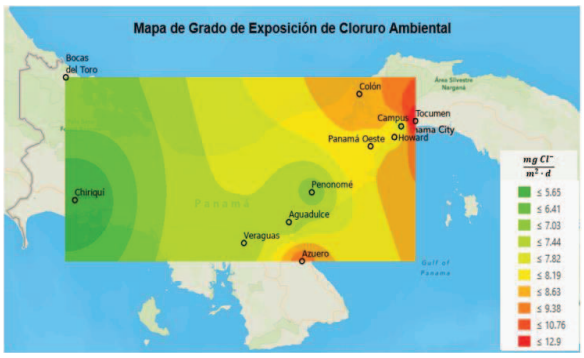


Fig. 8. Mapa de grado de exposición de cloruro ambiental.

Según los resultados obtenidos en el mapa de grado de exposición de cloruro ambiental de la Fig. 8, las áreas de mayor grado de exposición se observan en color anaranjado y rojo, y corresponden a la ciudades de Panamá y Colón, con valores promedios mayores a 8.0 mg Cl^-/m^2 / día. En la parte central de la República de Panamá predomina mayormente el tono verde claro a amarillo, presentando valores medios entre 6.0 y 8.0 mg Cl^-/m^2 / día. El área de menor grado de exposición se observó en la provincia de Chiriquí, demostrada gráficamente con un verde oscuro, y valores menores a 6.0 mg Cl^-/m^2 / día.

G. Correlación entre las propiedades características y el grado de exposición de las estructuras de concreto reforzado estudiadas

La gráfica de la Fig. 9 presenta tanto el cloruro ambiental promedio captado por estación como la distancia aproximada al mar de cada una de las estaciones, organizada de manera tal que va desde la menos crítica (mayor distancia al mar) hasta la estación con mayor proximidad a este.

De los resultados obtenidos en la Fig. 8 se observa la tendencia a que las estaciones más críticas, en cuanto a proximidad al mar, presentan valores promedio de cloruro ambiental mayores, con excepción de las estaciones de Tocumen (cloruro ambiental promedio más alto) y Chiriquí (cloruro ambiental promedio más bajo), donde ambas con una distancia aproximada al mar entre 6 000 y 7 000 metros se ven influenciadas por factores ambientales de su entorno.

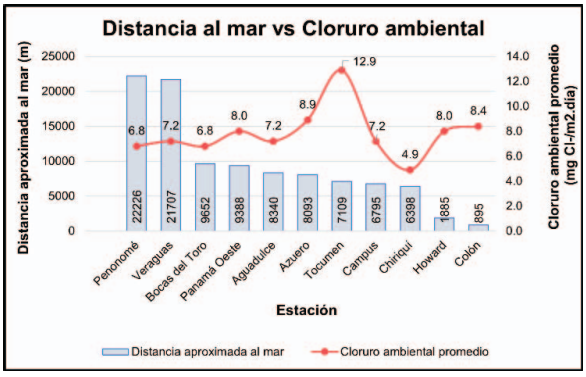


Fig. 9. Correlación entre distancia aproximada al mar y el cloruro ambiental promedio por estación de captación de cloruro ambiental.

H. Correlación de resultados obtenidos en la investigación con datos existentes de estudios patológicos realizados por el Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá

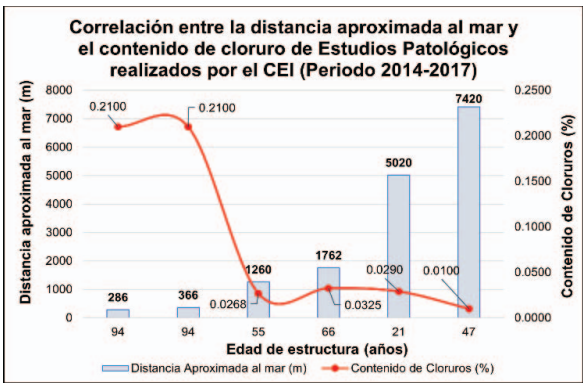


Fig. 10. Correlación entre distancia aproximada al mar y contenido de cloruro de estudios patológicos realizados por el CEI.

La revisión literaria conllevó a la recolección de data de 6 estudios patológicos realizados previamente por el CEI de la UTP en la ciudad de Panamá y en la provincia de Chiriquí, comprendidos en el periodo entre 2014 y 2017. Dentro de las propiedades estudiadas se encuentra: edad de la estructura, esfuerzo promedio, pH promedio, contenido de cloruro y la distancia al mar. Mediante la correlación de las propiedades características resultantes del concreto reforzado de los estudios patológicos descritos, la gráfica de la Fig. 10 muestra una marcada relación del contenido de cloruro en el concreto con la distancia al mar que mantenga la estructura analizada. De igual manera, otra variante incluida en el análisis es la edad de la edificación.

CONCLUSIONES

1. La patología estructural como proceso metodológico de mantenimiento ingenieril se establece como prioridad en la vida de cualquier edificación, permitiendo ganar conocimiento sobre el estado físico e integral actual de la estructura estudiada, posibilitando el correcto plan de acción para asegurar una prolongada vida útil. Al mismo tiempo, el proceso permite recolectar data útil para optimizar el proceso de diseño y construcción civil a futuro.

2. El ataque químico por el ion cloruro, en específico, muestra un comportamiento progresivo, silencioso y súbito. Este ion se introduce a la masa de concreto principalmente mediante un medio universal, la humedad, y ataca directamente al acero de refuerzo de la estructura, corroyéndolo, disminuyendo su sección transversal, afectando la integridad del concreto, provocando agrietamientos y consecuentemente debilitando su capacidad de resistencia y comprometiendo la seguridad de los usuarios que utilizan la estructura. Todo esto ocurre de una manera que muchas veces pasa desapercibida, si no se contemplan las condiciones ambientales y especialmente si no se realizan los debidos estudios patológicos, que indudablemente puedan evitar tragedias.

3. La afección de la integridad de las estructuras de concreto reforzado en el territorio nacional de Panamá debido a la penetración del ion cloruro a través de la porosidad de la composición física de la misma presenta una realidad a tratar directamente, priorizando su estudio, metodología y creación de sistemas completos de prevención y mantenimiento contemplando todas las fases involucradas en el proceso (diseño, construcción y operación).

4. La alta humedad relativa ambiental, la porosidad del concreto, la edad de una estructura y la cercanía que esta mantenga con el mar o con algún ambiente agresivo circundante, son factores que inciden directamente en las propiedades y el desempeño a largo plazo de las estructuras de concreto reforzado.

5. La República de Panamá, en prácticamente toda su extensión, presenta condiciones ambientales que propician y favorecen el ataque de cloruros a estructuras de concreto reforzado por su alta humedad relativa y su cercanía al mar.

6. Todas las estaciones instaladas de captación de cloruro ambiental presentaron una categoría de exposición de S1 (según la norma ISO 9223). La estación de la Extensión de Tocumen fue la que presentó un mayor grado de exposición al cloruro ambiental (12.9 mg Cl^- /m^2 / día), donde a pesar de no ser la estructura más crítica en cuanto a proximidad al mar, los niveles de cloruro también se ven afectados por entornos industriales, como lo es en este caso esta área. La estación de Chiriquí fue la que presentó el menor grado de exposición (4.9 mg Cl^- /m^2 / día).

7. De acuerdo con las categorías de exposición para la protección del refuerzo contra la corrosión, según la norma ACI-318, se deben tomar consideraciones sobre los requerimientos del concreto de la estructura expuesta. Las categorías de exposición al cloruro ambiental presentadas en este estudio se clasifican según la norma ISO 9223, que permite cuantificar la agresividad atmosférica desde el punto de vista de la corrosividad sobre materiales metálicos estructurales. En la República de Panamá se deben aplicar estas normas en las consideraciones para el diseño de mezclas de concreto. Se deben determinar las categorías de exposición con precisión por zonas geográficas, utilizando datos ambientales para garantizar una mayor durabilidad de las construcciones.

8. Los datos extraídos de los estudios patológicos realizados por el CEI presentan resultados claros de una relación directamente proporcional de resistencia promedio a la compresión y el pH promedio calculado, con la distancia al mar de las respectivas estructuras. Por otra parte, se observó una relación inversamente proporcional de la distancia al mar con el contenido de cloruros.

REFERENCIAS

[1] J. F. Lamond, «Diseñar para obtener durabilidad,» *Concrete International,* 1997.

[2] P. Thoft-Christensen, «Deterioration of Concrete Structures,» Structural Reliability Theory, vol. R0130, nº 204, 2002.

[3] H. A. Girón Vargas, «Ataque por cloruros en el concreto,» *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.,* Octubre 1998.

[4] M. Sanjuán y P. Castro, Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto, México: IMCYC, 2001.

[5] E. L. Rivva, Durabilidad y Patologia del Concreto, Lima, 2006.

[6] Comittee ISO/TC 156: Corrosion of metals and alloys, «ISO 9225:2012. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres,» 2012.

[7] American Water Works Association (AWWA), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 407A, vol. 17, W. P. C. Federation, Ed., American Public Health Association (APHA), 1989.

[8] ASTM Committee C09, «ASTM C42/C42M-18: Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete,» 2018.

[9] ASTM Committee C09, «ASTM C39/C39M-17b: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» ASTM, 2017.

Minimum safety criteria in the design stage of supported and suspended scaffolding

Criterios mínimos de seguridad en la etapa de diseño de andamios fijos y guindolas

Cristel Julissa Cedeño Martínez
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
cristel.cedeno@utp.ac.pa

Yarleny Jurieta Mc Naughton Perea
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
yarleny.mcnaughton@utp.ac.pa

Milagros Pinto Nuñez
Laboratorio de Estructuras, Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
milagros.pinto@utp.ac.pa

***Abstract*— This article presents the results of a study whose objective was to identify the minimum safety criteria required in the design stage of scaffolding. A literary review was conducted through a content analysis of 24 safety regulations for scaffolding, including Panamanian and foreign standards. The study considers provisions for suspended and supported scaffoldings, excluding falsework. As a result, 24 safety criteria were identified and defined at the scaffolding design stage. These were validated through a survey addressed to the technical staff of the Structures Laboratory of the Universidad Tecnológica de Panamá. In addition, recommendations are provided for an update of the national regulation, including a scaffolding classification proposal. It should be noted that this article is part of a research project with a second phase in which it is intended to validate, through experimentation, the safety criteria found in the literary review.**

Keywords—scaffolding, suspended scaffold, supported scaffold, safety at heights, scaffolding safety criteria, scaffolding safety regulations.

***Resumen* — Este artículo presenta los resultados de un estudio cuyo objetivo fue identificar los criterios de seguridad mínimos requeridos en la etapa de diseño del andamio. Para esto se realizó una revisión literaria por medio de un análisis de contenido de 24 normativas de seguridad para andamios, incluyendo normas tanto panameñas como extranjeras. El estudio considera disposiciones para andamios colgantes (guindolas) y andamios fijos, excluyendo andamios de soporte. Como resultado, se identificaron y definieron 24 criterios de seguridad en la etapa de diseño del andamio. Estos fueron validados a través de una encuesta dirigida al personal técnico del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Tecnológica de Panamá (LABEST). Además, se brindan recomendaciones para mejorar la seguridad en el uso de andamios, incluyendo una propuesta de clasificación para los andamios. Cabe destacar que este artículo forma parte de un proyecto de investigación con una segunda fase en la cual se pretende validar, a través de la experimentación, los criterios de seguridad hallados en la revisión literaria.**

Palabras claves —andamios, andamio fijo, andamio suspendido, guindola, seguridad en alturas, criterios de seguridad de andamios, reglamentos de seguridad de andamios.

I. Introducción

Según estimaciones publicadas por la Organización Internacional del Trabajo, 2,78 millones de trabajadores fallecen cada año por accidentes del trabajo y enfermedades profesionales y 374 millones de trabajadores sufren accidentes del trabajo no mortales [1]. Adicional a esto, se calcula que los días de trabajo perdidos a causa de accidentes y enfermedades laborales representan aproximadamente el 4% del PIB mundial y en algunos países hasta el 6% o más [1]. En Panamá, la construcción es uno de los sectores que más empleos genera [2] y, a su vez, es la industria que presenta mayor registro de accidentes laborales. Estas importantes cifras han convertido a la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) en un tema de interés para todos aquellos que velan por el cuidado del recurso humano [3]. Se considera que la SST es un aspecto clave para el desarrollo sostenible de un país y que la inversión en esta contribuye a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 3 (Salud y bienestar) y ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) [1].

En el sector construcción se desarrollan algunas de las actividades de mayor riesgo profesional, siendo el más común las caídas desde alturas. Estos sucesos ocasionan graves y fatales lesiones a los trabajadores atentando así contra la salud pública [4]. Para evitar este tipo de accidentes, se han desarrollado sistemas de protección contra caídas, como: sistemas personales de detención de caídas, sistemas de barandas, sistemas de redes de seguridad, sistemas de aparatos de posicionamiento, sistemas de líneas de advertencia y sistemas de monitoreo de seguridad [5].

Los andamios son estructuras temporales con protección contra caídas, que permiten a las personas acceder y realizar trabajos en alturas. Estas estructuras temporales soportan las cargas verticales provenientes de los trabajadores, equipo de construcción, materiales y otros. Los andamios también pueden ser diseñados para soportar cargas laterales, de impacto y sísmicas. Dependiendo de su uso pueden ser andamios de acceso (trabajo o albañilería) o de soporte [6]. Estas estructuras son erigidas y utilizadas para todo tipo de construcción, demolición y mantenimiento general de infraestructura [7].

Históricamente, los andamios han sido utilizados desde la antigüedad para construir monumentos y estructuras [7]. Existen evidencias de su utilización en las cuevas de Lascaux, Francia [8], las Pirámides Egipcias [9] y en la antigua Grecia y China a principios del siglo quinto a. C. [10]. En Europa, fueron utilizados durante la edad medieval para la construcción de iglesias y abadías [8]. Estos primeros andamios se confeccionaban de madera atada con cuerdas de cáñamo. Posteriormente, en el siglo XX inició la fabricación

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00031

de andamios de aluminio y acero. Con ella también surgen accesorios como los acopladores o conectores patentados por David y Daniel Palmer-Jones [11]. Posteriormente, en 1944, surge el primer sistema de marco metálico [8] y, a finales del siglo XIX surge la compañía "Palmers Scaffolding Company" donde se diseñan las primeras plataformas suspendidas desplazables. En la medida en que crecía la industria de la construcción aumentaba la demanda e industrialización de estos sistemas. No obstante, las deficientes prácticas de seguridad e higiene permitían que los accidentes fueran cada vez más frecuentes. En vista de mejorar las condiciones laborales, la OSHA emite en 1971 el primer estándar para el uso de andamios en la construcción.

Existen evidencias sobre el uso de los andamios en Panamá desde la construcción del Canal en 1913. A través de los años, se continúa su uso para la construcción, mantenimiento y rehabilitación de obras. Entre las regulaciones que surgen para controlar los accidentes se encuentran la norma de seguridad de andamios emitida en el 2004 por la Unidad de Seguridad e Higiene Industrial del Canal de Panamá; la Convención Colectiva CAPAC-SUNTRACS 2006-2013 que reglamenta el uso de los andamios emitida en el 2006; y en el 2008, el Decreto Ejecutivo N°2 del 15 de febrero de 2008, por el cual se reglamenta la seguridad, salud e higiene en la industria de la construcción [12] y se norman los criterios de seguridad para andamios fijos y guindolas. En este se presenta la primera clasificación para andamios a nivel nacional, siendo estos: (1) andamios construidos en obra, (2) andamios rodantes y (3) andamios colgantes móviles o guindolas. Cabe destacar, que las normas que regulan el uso y diseño de los andamios en Panamá rigen desde hace más de diez años, en los cuales no se han publicado actualizaciones.

En este estudio, criterios de seguridad mínimos requeridos en la etapa de diseño del andamio son identificados y definidos. Los criterios de seguridad presentados se clasifican por componente del andamio: plataforma, sistema de baranda y otros. Cabe destacar que este artículo forma parte de un proyecto de investigación con una segunda fase en la cual se pretende validar, a través de la experimentación, los criterios de seguridad hallados en la revisión literaria.

II. Revisión Literaria

A. Relación entre seguridad y andamio

El trabajo sobre andamios es considerado una de las actividades más peligrosas dentro de la industria de la construcción [13]. En los proyectos de construcción es común el trabajo en alturas, lo que genera una necesidad en el uso de estructuras temporales, dando paso, a pesar de la existencia de sistemas de protección, al riesgo de sufrir accidentes. Estudios muestran que los colapsos de los andamios ocurren a causa de la inadecuada supervisión del lugar y un diseño pobre [14]. Se han identificado cuatro factores asociados a accidentes [15], entre estos; (1) plataformas incompletas, (2) accesos insuficientes, (3) barandas incompletas y (4) falta de anclajes al edificio donde se requerían. En este mismo estudio, se han asociado cuatro factores estadísticamente significativos, entre estos: (1) la formación de la persona competente en el sitio, (2) quién erigió el andamio, (3) el tipo de andamio y (4) el número de trabajadores presentes en el sitio. Otras investigaciones [16], [17] aportaron a la identificación de las fallas técnicas más importantes, entre estas: falta o dispositivos de protección inadecuados, falta o medidas inadecuadas de protección colectiva, estructura espacial inadecuada de andamios y estabilidad inadecuada de andamios.

No existe el riesgo cero en la utilización de andamios, pero se puede reducir al mínimo tomando medidas preventivas [18]. Los diseñadores, montadores de andamios y usuarios deben colaborar para lograr que los andamios cumplan con capacidad, seguridad y comodidad [19]. Para ello, es importante que se cumplan con normativas, dado que estas cuentan con requisitos mínimos de seguridad en construcción, estabilidad, geometría y cargas de trabajo [20]. Muestra de ello es un estudio desarrollado en Andalucía, donde se realizó una evaluación cualitativa de las condiciones de seguridad de los andamios fijos en base a las normativas europeas EN 12810 y EN 12811. Se analizaron las condiciones de los arriostramientos, anclajes, zócalos, barandillas, escaleras, puntales, vigas, travesaños, plataformas, soportes, entre otros, y se encontró que aquellos andamios que cumplían con los estándares tenían un mayor nivel de seguridad que aquellos que no cumplían [21]. Por otra parte, en un estudio se utilizó el registro de colapsos de andamios de la OSHA, dando como resultado la clasificación final de dos categorías de causas: (1) diseño inadecuado y (2) errores de construcción. Adicionalmente, identificaron seis categorías de tipos de falla: (1) errores de fabricación, (2) cargas de viento, (3) problema con los tablones, (4) espacios excesivos, (5) tablones mal asegurados y (6) otros factores relacionados con el diseño [22]. Este tipo de estudios dejan en evidencia la importancia de poder contar con bases de datos que permitan establecer una relación entre seguridad y andamio. Poder contar con normas y especificaciones claras apoyan a determinar o evaluar estos aspectos. Para las investigaciones se requiere que estas bases de datos cuenten con un registro organizado, claro y detallado para conocer con aproximación las condiciones del andamio. Actualmente, se puede contar con registros de accidentes, pero a menudo estas bases de datos pueden no estar alineadas con las necesidades de los investigadores para realizar un análisis profundo [4].

B. Estadísticas de accidentes en Panamá

La entidad encargada del registro por accidentes laborales en Panamá es el Ministerio de Trabajo y Desarrollo Laboral (MITRADEL). Entre los años 2014 y 2017 se presentaron un total de 200 registros de accidentes entre fatales y no fatales. El 59,5% ocurrieron dentro de la industria de la construcción. De este porcentaje, el 37.8% corresponden a caídas de altura, siendo esta la mayor causa de accidentes. Entre estos, el 22.2% involucra el uso de andamios, donde el 50% fueron andamios fijos y el otro 50% fueron guindolas. Otra entidad que mantiene un registro de accidentes es el Sindicato Único Nacional de Trabajadores de la Industria de la Construcción y Similares (SUNTRACS), quienes presentaron 39 accidentes fatales entre enero de 2016 a diciembre de 2018. El 35.9% de estos fueron producto de caídas de altura, sin embargo, la información suministrada no especifica otros detalles.

A pesar de que se obtuvo acceso a registros de accidentes por parte del MITRADEL y SUNTRACS, no fue posible encontrar una correspondencia entre sus datos ni establecer una relación seguridad-andamio. Para determinar este tipo de relación, aún hace falta información organizada que permita cuantificar lo accidentes en relación con el uso, diseño, instalación o mantenimiento de los andamios.

C. Clasificación de los andamios

La clasificación de los andamios puede variar considerando distintos criterios, entre estos, clases de carga, material, funciones, tipo de conexión, etc. De manera que, entre la literatura y normas consultadas no se encontró un consenso entre clasificaciones. Para esta investigación se propone manejar la siguiente clasificación:

1) Andamio colgante o guindola: es una estructura suspendida por medio de un sistema mecánico. Estos pueden ser de un punto, dos puntos o múltiples puntos. Los andamios colgantes o guindolas de dos puntos se consideran uno de los más comunes [23].

2) Andamio fijo: son aquellos que se apoyan desde la base. De acuerdo con su función, estos pueden ser para albañilería o de soporte. Ambos se subdividen de la siguiente forma:

a) Andamio de marco prefabricado: es uno de los más utilizados en la industria de la construcción porque permiten la reducción del tiempo en montaje, desmontaje y costos [24]. En la Fig. 1 se presenta un ejemplo de este tipo de andamios.

b) Andamio multidireccional: son aquellos que se ensamblan a partir de piezas tubulares individuales y permiten adaptar su forma a las necesidades del trabajo a realizar. Entre estos, se tienen los de "tubo y acoplador", siendo un sistema clásico y los de tipo Ringlock y Cuplock®, que son modelos que se han desarrollado con aditamentos especiales que permiten un mayor número de elementos conectados en el mismo nodo. Es importante señalar que los andamios de este tipo requieren un análisis y calculo estructural previo, debido a que permiten diferentes configuraciones en el montaje [25].

c) Otros: son aquellos con diseños especiales o características específicas que no entrarían dentro de las clasificaciones anteriores.

Este estudio se enfocará en los andamios colgantes de dos puntos y los andamios fijos de trabajo.

D. Componentes de las guindolas y andamios fijos

Los andamios fijos se componen de marcos prefabricados, crucetas, elementos tubulares, conexiones, anclajes, bases, cabezales y medio de acceso. Las guindolas, por su parte, se componen de un sistema de izado el cual no forma parte de este estudio. Ambos mantienen los componentes de plataforma de trabajo y sistema de barandas. Todos estos se describen a continuación:

1) Sistema de barandas: consiste en la protección contra caída, que incluye una baranda superior, baranda intermedia, rodapié y conexión al sistema de izado. De ser necesario, se añaden postes intermedios.

2) Plataforma de trabajo: elemento conformado por vigas principales, vigas secundarias y piso de plataforma. OSHA define la plataforma como la superficie elevada utilizada para caminar o trabajar de manera que los empleados cumplan con sus tareas [26]. Para estas, se pueden utilizar elementos metálicos o no metálicos como estructura de soporte con piso de malla, típico de plataformas prefabricadas [27]. Además, se pueden emplear otros materiales como tablones fabricados o maderas macizas [28].

3) Marcos prefabricados y crucetas: los marcos prefabricados son originarios de Estados Unidos. Fueron ideados para trabajos de albañilería y con el tiempo han variado los diseños, resultando en marcos abiertos y cerrados. También, se fabrican marcos de alta resistencia estructural para apuntalamiento. El diámetro de los tubos de estos varía entre 41 y 43 mm, con espesores entre 2,40 y 3,20 mm [7]. Las crucetas son los elementos que unen y brindan la estabilidad lateral a los marcos. Su diámetro varía entre 22 y 25 mm, con espesores entre 1,80 y 2,40 mm. Las crucetas reducen la longitud efectiva y el andamio puede colapsar si no cuenta con la adecuada instalación de estas [29].

4) Elementos tubulares: son los que conforman el cuerpo de los andamios multidireccionales. Están compuestos por elementos verticales, horizontales y diagonales. La forma y los aditamentos de los tubos varían dependiendo del modelo de conexión del fabricante, pero generalmente mantienen un diámetro externo de 48,3 mm [7].

5) Conexiones y anclajes: son las uniones y apoyos del sistema de andamiaje. El tipo o diseño de la conexión depende del fabricante. Las conexiones de los andamios Cuplock®, por ejemplo, han sido estudiadas y se ha demostrado la importancia de la correcta modelación de las conexiones para predecir mejor la estabilidad y capacidad de los elementos verticales [30].

6) Bases: las bases son el soporte inferior de la estructura de andamiaje. Existen las bases con ruedas, la placa base y la placa regulable. El buen soporte también depende de la condición del suelo sobre el que se apoya [19]. Las bases con ruedas facilitan los trabajos que requieren cambiar de posición frecuentemente [31], pero requieren de frenos para evitar que se muevan durante su uso.

7) Medios de acceso entre plataformas: son las escaleras o medios de acceso vertical seguro a la plataforma de trabajo [32]. Estas deben estar fijadas al andamio [33] y es recomendable evitar escalar el andamio por su parte externa, a menos que esté diseñado con este propósito.

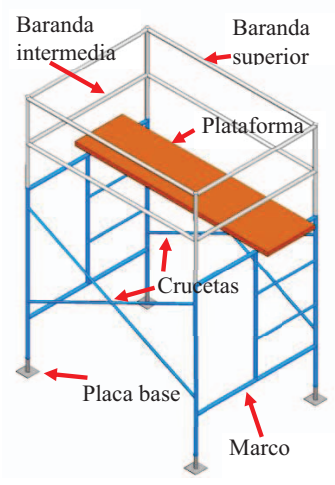


Fig. 1. Andamio fijo de marco prefabricado y sus partes

Las guindolas adicionalmente tienen un sistema de izado, cuyos componentes no forman parte de este estudio. Sin

embargo, son de importancia dado que estudios han atribuido fallas a este, en donde se ha encontrado contrapesos insuficientes o mal anclados, así como fallas en las cuerdas y mantenimiento insuficiente [34].

III. METODOLOGÍA

En este artículo, se llevó a cabo un estudio de los criterios mínimos de seguridad para andamios que deben establecerse durante la etapa de diseño. Se utilizó el proceso análisis de contenido cualitativo, este método se refiere a un conjunto de técnicas de organización de informaciones, un procedimiento para datos cualitativos en busca de nuevos temas/tópicos y conceptos/conocimientos [35]. Esta es una herramienta que apoya al conocimiento exhaustivo de la información existente en una fuente documental [36]. El planteamiento procedimental para este tipo de análisis se divide en tres fases, las cuales se observan en la [37] **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**:

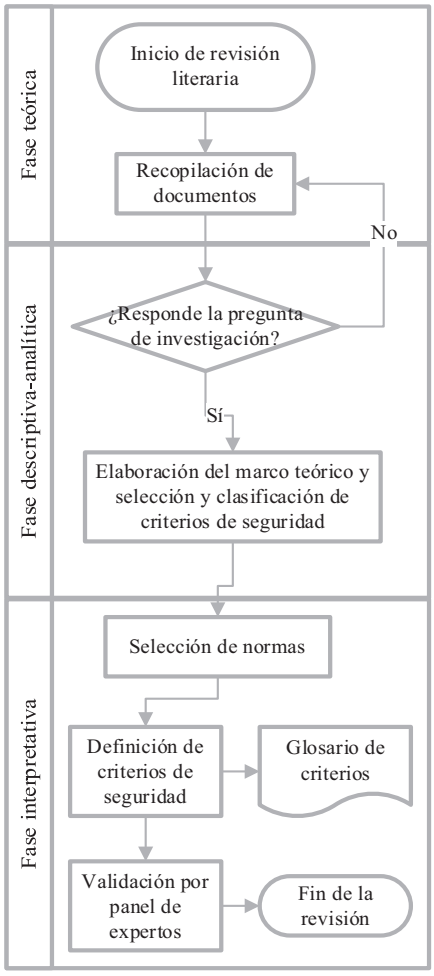


Fig. 2. Metodología de la revisión literaria

A. *Teórica: elección de los documentos a analizar*

Para llevar a cabo la recopilación de los datos es importante plantear el problema a resolver de manera que se tenga claro a que dirección se dirige el estudio. En este caso, la pregunta de investigación es:

- ¿Cuáles son los criterios mínimos de seguridad para andamios que deben establecerse durante la etapa de diseño?

La fase inició seleccionando las bases de datos en las cuales se realizarían las búsquedas de las palabras claves: "andamio", "andamio colgante", "andamio de marco", "andamio de albañilería", "seguridad en el andamio", "caídas desde altura", "accidentes en la construcción", "guindolas", "scaffold", "scaffolding", "scaffold history", etc.

Para este estudio se seleccionó Google y Google Scholar debido a que se estima que en este buscador se puede encontrar casi el 90% de los documentos académicos en la web escritos en inglés [38], ScienceDirect, una base de datos con 12 millones de contenidos de 3 500 revistas académicas y 34 000 libros electrónicos [39] y ASCE Library, una base de datos de ingeniería civil que ofrece acceso en línea a más de 145 000 documentos técnicos y profesionales [40]. También se realizaron búsquedas en las bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Panamá y Universidad de Panamá con el objetivo de acceder a información generada por miembros de la comunidad científica local. Otras bases de datos fueron descartadas debido a que no se obtuvo acceso oportuno a los documentos o los resultados no correspondían al tema de investigación. Se consultó también los registros de accidentes en la construcción reportados al MITRADEL (2014-2018) y al SUNTRACS (2016-2019), además de sitios web de noticias de medio con el objetivo de conocer la relación entre la seguridad y el andamio en Panamá.

Se consultaron normas, manuales y estándares tomando en cuenta aquellos que incluyeran disposiciones para andamios fijos y/o guindolas. En una revisión inicial se consideraron tres regiones geográficas: América, Europa, y Oceanía. Para la región de América se consultaron las normas en México, Costa Rica, Colombia, Chile, Ecuador y Estados Unidos, además de las panameñas, con el propósito de obtener una visión general mayor de las normativas en andamios dentro de la región.

B. *Descriptiva-analítica: descripción de los documentos y análisis del contenido*

Luego de la búsqueda y recopilación de documentos. Se utilizó el software de gestión de referencias de Mendeley® para archivar la bibliografía comentada, clasificar los documentos por tipo y descartar aquellos no referentes al tema de investigación. Durante este ejercicio, los registros de accidentes fueron clasificados en fatales y no fatales de los cuales solo se tomó en cuenta información hasta el último año de registro completo. En el caso de las normas, se identificaron las disposiciones requeridas para los andamios en su etapa de diseño, en especial, aquellas relacionadas a la seguridad estructural, la seguridad al usuario y la seguridad a terceros, y verificables en el laboratorio de los cuales se elaboró una lista de 24 criterios de seguridad. Estos criterios se dividieron en cuatro grupos de acuerdo con su componente correspondiente: cuerpo del andamio, plataforma, baranda y otros.

C. *Interpretativa: que da paso a la interpretación y discusión.*

Debido a que la mayoría de las normas consultadas compartían referencias a estándares europeos y estadounidenses, se trabajó con estas. Adicionalmente, se

agregó una última referencia de otro continente, Oceanía, por lo que se agregó a la lista el estándar de Australia/Nueva Zelanda. Por consiguiente, de los 24 documentos iniciales se consideraron: OSHA 1926 SUB-PARTE L y ANSI/ASSP A10.8-2019 (estándares estadounidenses); UNE EN 12810-1:2005, UNE EN 12810-2:2005, UNE EN 12811-1:2005, UNE EN 12811-2:2005 y la BS EN 1808:2015 (estándares europeos); AS/NZS 1576.1:2010 (estándares australianos neozelandés); y, el Decreto Ejecutivo N.2 de 15 de febrero de 2008 y el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT-81-2009 (normas panameñas) mostrados en la TABLA I.

TABLA I. NORMAS Y ESTÁNDARES UTILIZADOS

País	Descripción del estándar/norma		
	Cantidad	*Año de publicación*	*Norma/Estándar*
Panamá	2	2008-2009	Decreto Ejecutivo N.2 de 15 de febrero de 2008 y el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT-81-2009
Estados Unidos	2	1996-2019	OSHA 1926 SUB PARTE L y ANSI/ASSP A10.8-2019
Australia/ Nueva Zelanda	1	2010	AS/NZS 1576.1:2010
Europa	5	2005-2015	UNE EN 12810-1:2005, UNE EN 12810-2:2005, UNE EN 12811-1:2005, UNE EN 12811-2:2005 y la BS EN 1808:2015

Fuente: elaboración propia.

En la Fig. 3 se observa la incidencia de los estándares de Estados Unidos y Europa. En Costa Rica, Colombia, México, Panamá y Ecuador se tiene como principal referencia la norma OSHA y los estándares ANSI. Chile, por su parte, utiliza los estándares europeos.

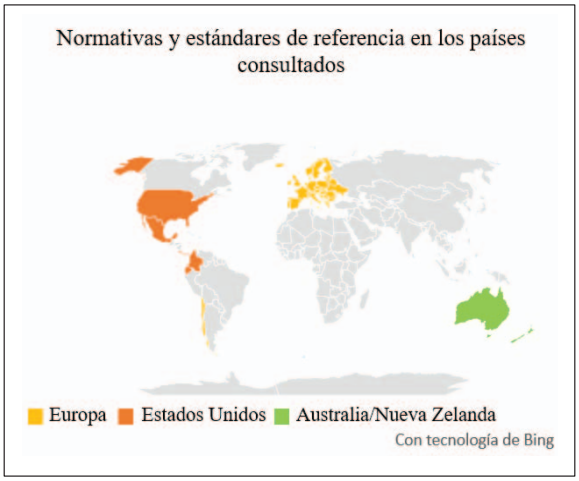


Fig. 3. Incidencia de normas de Estados Unidos y Europa

En Panamá, el Laboratorio de Estructuras (LABEST) es uno de los encargados a nivel nacional de elaborar la verificación del cumplimiento de los criterios de seguridad mínimos que se deben cumplir en concordancia con la reglamentación panameña. Este ha evaluado y acumulado un registro histórico de ensayos para andamios fijos y guindolas.

Como instrumento de validación para los 24 criterios propuestos se llevó a cabo una encuesta dirigida a ingenieros del LABEST, con el objetivo de determinar para cada criterio:

1) Clasificación de importancia: dentro del grupo de criterios, ordenar de mayor a menor importancia.

2) Verificabilidad en el LABEST: indicar si el criterio es o no verificable en el LABEST.

3) Claridad de definición: indicar si el criterio está o no definido con claridad.

4) Apropiado o no para definir la seguridad del andamio: indicar si el criterio es apropiado o no para definir la seguridad del andamio.

5) Fusión de criterios: indicar si uno o varios criterios pueden fusionarse en uno solo.

Como complemento a la encuesta se consultó si agregarían o no algún criterio a la lista y se les pidió sus observaciones.

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A. Clasificación de andamios

La normativa panameña actualmente presenta una clasificación dentro de la cual no se contempla la diversidad en los modelos de andamios. De la revisión literaria, no se logró identificar una clasificación estándar u homologada entre todas las normas técnicas. Es por ello que se propone la clasificación de los andamios en fijos (que pueden ser de trabajo o soporte, de marco prefabricado, multidireccionales u otros.) y colgantes o guindolas.

B. Criterios de seguridad

La seguridad debe ser tomada en cuenta en cada etapa de la vida de un andamio: diseño, construcción, empleo y desmantelamiento. Se ha descrito la necesidad del cumplimiento de requerimientos mínimos en cuanto a la estabilidad, resistencia, rigidez y seguridad al usuario y a terceros [41]. Identificar estos requerimientos y plasmarlos en criterios permite tener una herramienta de evaluación del desempeño del sistema, así como de su seguridad.

En base a la examinación de normas de andamios, se recopilaron 24 criterios asociados a la etapa de diseño. De estos, siete (7) criterios de seguridad para las plataformas, seis (6) para el sistema de barandas, siete (7) para el cuerpo del andamio y cuatro (4) en otros. Estos se presentan en la TABLA II.

C. Definición de los criterios de seguridad

1) Cargas de cálculo para plataformas: valores de cargas que debe soportar la plataforma, de acuerdo con el uso del andamio.

2) Luces máximas para plataforma: dimensión longitudinal máxima de la plataforma.

3) Deflexión máxima para plataforma: desplazamiento vertical máximo que puede experimentar la plataforma en el centro producto de las cargas aplicadas.

4) Espesor mínimo para plataforma: espesor mínimo del material del piso de la plataforma.

5) Material de plataforma: materiales utilizados para el piso de la plataforma.

6) Anclaje de plataforma al andamio: condición que impide el movimiento de la plataforma mediante accesorios que permiten mantenerla fija al andamio.

TABLA II. CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA ANDAMIOS

Componente	**Criterios de seguridad para plataformas y barandas**	
	Criterios de seguridad estructural	***Criterios de seguridad al usuario y a terceros***
Plataforma	Cargas de cálculo Luces máximas Deflexión máxima Espesor mínimo Material Anclaje al andamio	Ancho mínimo
Baranda	Resistencia Deflexión máxima Material	Altura de baranda superior Altura de baranda intermedia Distancia entre postes
Cuerpo del andamio	Arriostramiento a elementos de la estrutura Factor de seguridad para resistencia de carga Combinación de carga para el diseño estructural Dimensiones mínimas para tubos Propiedades de los tubos Relación de altura máxima sin arriostramiento	Altura mínima entre áreas de trabajo
Otros	Condiciones de bases o soportes Conexiones	Rodapié Medio de acceso

Fuente: elaboración propia.

7) Ancho mínimo para plataformas: dimensión transversal mínima de la plataforma.

8) Resistencia de barandas: Carga mínima que debe soportar sin fallar la baranda.

9) Deflexión máxima de barandas: desplazamiento horizontal y/o vertical máximo de la baranda superior y la baranda intermedia.

10) Material de barandas: materiales utilizados para los componentes del sistema de barandas.

11) Altura de baranda superior: distancia vertical sobre la superficie de la plataforma en la que se debe ubicar la baranda superior.

12) Altura de baranda intermedia: distancia vertical sobre la superficie de la plataforma en la que se debe ubicar la baranda intermedia.

13) Distancia entre postes: longitud máxima entre los elementos verticales que soportan las barandas.

14) Arriostramiento a elementos de la estructura: uso y disposición de la conexión entre los apoyos o anclajes del andamio determinada por la relación de altura máxima o estabilidad lateral.

15) Factor de seguridad para resistencia de carga: coeficiente por el cual se multiplica la carga de servicio y se obtiene la carga máxima que debe soportar la estructura.

16) Combinación de cargas para el diseño estructural: combinación de la acción de múltiples cargas sobre la estructura del andamio para satisfacer requerimientos de diseño por resistencia, estabilidad y serviciabilidad.

17) Dimensiones mínimas para tubos: diámetro y espesor de los tubos utilizados para el andamio.

18) Propiedades de los tubos: propiedades elásticas mínimas con las que deben cumplir los tubos empleados en el andamio, según el tipo de material.

19) Relación de altura máxima sin arriostramiento: altura máxima a la cual puede erigirse el andamio dada por una relación geométrica ancho de base versus altura.

20) Altura mínima entre áreas de trabajo: distancia libre entre superficies de trabajo.

21) Condiciones de bases o soportes: conjunto de características básicas o generales que deben cumplir los soportes, como los tipos de base, geometría, material y resistencia.

22) Conexiones: disposiciones generales que deben cumplir las conexiones como material, resistencia y geometría.

23) Rodapié: altura, espesor y resistencia del rodapié.

24) Medios de acceso: disposiciones sobre la inclusión de medios de acceso seguros, así como los tipos y la geometría de escaleras u otros medios de acceso a las plataformas del andamio.

D. Validación por los expertos

En la TABLA III se presenta el resultado de la encuesta realizada al personal técnico que elabora los ensayos y reportes en el LABEST. De los 24 criterios propuestos, 15 fueron reportados como verificables, claros en definición y apropiados para definir la seguridad por el LABEST. En base a estos 15 criterios, en la TABLA IV se muestran los resultados a la pregunta de clasificación de importancia, por componente. Los criterios de combinación de carga para el diseño estructural y cargas de cálculo para plataforma no fueron identificados en el Decreto ni el Reglamento panameño.

TABLA III. RESULTADO DE LA ENCUESTA

Aspecto consultado	**Resultado de encuesta de validación**
	Criterios de seguridad
Criterios reportados como no verificables por el LABEST	Propiedades de los tubos, Material de plataforma, Conexiones, Altura mínima entre áreas de trabajo, Medio de acceso.
Criterios reportados con definición no clara	Conexiones.
Criterios reportados como no apropiados para definir la seguridad en el andamio	Relación de altura máxima sin arriostramiento, Dimensiones mínimas para tubos, Espesor mínimo para plataforma, Distancia entre postes.
Criterios que se podrían fusionar	Dimensiones mínimas para tubos y Propiedades de los tubos.

Fuente: elaboración propia.

TABLA IV. ORDEN DE IMPORTANCIA DE LOS CRITERIOS DE SEGURIDAD

Componente	***Criterios de seguridad organizados de mayor a menor importancia***
Cuerpo del andamio	1. Combinación de carga para el diseño estructural 2. Factor de seguridad para resistencia de carga 3. Arriostramiento a elementos de la estructura
Plataforma	1. Cargas de cálculo para plataforma

Componente	*Criterios de seguridad organizados de mayor a menor importancia*
	2. Anclaje de plataforma al andamio 3. Ancho mínimo para plataformas 4. Deflexión máxima para plataforma 5. Luces máximas para plataforma
Baranda	1. Resistencia de barandas 2. Altura de baranda superior 3. Altura de baranda intermedia 4. Deflexión máxima de barandas 5. Material de barandas
Otros	1. Condiciones de bases o soportes 2. Rodapié

Fuente: elaboración propia

V. CONCLUSIONES

Las normativas de seguridad en la construcción panameñas datan de hace más de 10 años y hasta el momento no se han publicado actualizaciones. Adicionalmente, se observó que los registros de accidentes reportados por el MITRADEL y SUNTRACS, a los que se tuvo acceso, carecen de información técnica que pueda asociarse a los actuales criterios de seguridad dentro del Decreto Ejecutivo N.2 de 15 de febrero de 2008, de forma que difícilmente se puede establecer una relación entre los accidentes desde andamios y alguna deficiencia estructural en el diseño de estos. Es fundamental la elaboración de registros más específicos y estandarizados, y que estos sean de acceso al público. Esto permitirá que futuras investigaciones puedan centrarse en el estudio de algún componente en particular.

De la revisión a los estándares y normas se identificaron 24 criterios, de los cuales 20 fueron considerados por el LABEST como apropiados para definir la seguridad del andamio y 15 de estos verificables de acuerdo con la capacidad actual del laboratorio.

En cuanto a importancia, la combinación de carga para el diseño estructural, las cargas de cálculo para plataforma, la resistencia de barandas y las condiciones de bases o soportes ocuparon el primer lugar por componentes.

Como propuesta para actualizar la reglamentación panameña, se pueden tomar como referencia la estructura de los estándares norteamericanos y europeos, que parten de criterios de seguridad mínimos, generales, aplicables a todo tipo de andamio y posteriormente establecen criterios de seguridad específicos. Sin embargo, es importante definir el alcance de estos criterios y plasmarlos de forma que tengan un alto nivel de detalle evitando ser ambiguo o libre a la interpretación.

Para la clasificación de los andamios se propuso categorizarlos por andamios fijos y andamios colgantes (guindolas). Los andamios fijos se clasifican en: andamio de marco prefabricado, andamio multidireccional y otros. Recordando que, dentro de los andamios fijos se tienen los de trabajo y los de soporte. Los andamios de soporte no formaron parte de este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del Laboratorio de Estructura del Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá, por el apoyo brindado en la encuesta y acceso al protocolo de ensayos para la evaluación de los andamios.

REFERENCIAS

[1] Organización Internacional del Trabajo, Seguridad y salud en el centro del futuro del trabajo. 2019. [Online]. Available: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms_686762.pdf

[2] Y. Valdés, "Industria de la construcción tardará dos años mínimo en recuperarse," Panamá América, Mar. 14, 2021. https://www.panamaamerica.com.pa/economia/industria-construccion-tardara-dos-anos-minimo-en-recuperarse-1183285 (accessed May 07, 2021).

[3] F. A. S. Sánchez, G. I. C. Peláez, and J. C. Alís, "Occupational Safety and Health in Construction: a review of applications and trends," Industrial Health, vol. 55, pp. 210–218, 2017.

[4] E. A. Nadhim, C. Hon, B. Xia, I. Stewart, and D. Fang, "Falls from height in the construction industry: A critical review of the scientific literature," International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 13, no. 7, 2016, doi: 10.3390/ijerph13070638.

[5] División de Compensación para Trabajadores, Protección contra Caídas para la Industria de la Construcción Código de Normas Federales 1926, Punto M, vol. 2, no. 2. Texas Department of Insurance, 2009. doi: 10.1016/j.cub.2015.10.018.

[6] T. Chandrangsu and K. J. R. Rasmussen, "Structural modelling of support scaffold systems," Journal of Constructional Steel Research, vol. 67, no. 5, pp. 866–875, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.12.007.

[7] M. Marks, Scaffolding - the handbook for estimating and product knowledge, 1st ed. PAGE PUBLISHING, INC, 2016.

[8] C. Waters, "Reaching for the sky - A potted history of scaffolding | ScaffMag.com," ScaffMag- The Scaffolding Magazine, Dec. 09, 2016. https://scaffmag.com/2016/12/reaching-for-the-sky-a-potted-history-of-scaffolding/ (accessed Jan. 27, 2020).

[9] A. Choisy, El Arte de Construir en Egipto, 1st ed. Instituto Juan de Herrera, 2006.

[10] Heena Wood and Steel Industries, "Scaffolding Importance and Best Scaffolding Suppliers in Bangalore," 2018. https://heenascaffolding.com/scaffolding-importance-and-best-scaffolding-suppliers-in-bangalore/

[11] C. Mules, "Scaffolding leader celebrates '100 years strong,'" BIC Magazine, Apr. 04, 2018. https://www.bicmagazine.com/departments/lift-transport/april-2018-scaffolding-leader-celebrates-100-years-strong/ (accessed Aug. 30, 2020).

[12] Ministerio de Trabajo y Desarrollo Laboral, "Decreto Ejecutivo No 2 de 15 de febrero de 2008 Por el cual se reglamenta la Seguridad, Salud e Higiene en la Industria de la Construcción." (Gaceta Oficial 25979), Panamá, Panamá, 2008. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/25979/8985.pdf

[13] R. Solís, "One hundred months of construction accidents in the southeast of Mexico," Revista Ingenieria de Construccion, vol. 32, no. 3, pp. 195–204, 2017, doi: 10.9734/bjast/2017/33275.

[14] R. G. Beale, "Scaffold research - A review," Journal of Constructional Steel Research, vol. 98, pp. 188–200, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.01.016.

[15] K. M. Halperin and M. McCann, "An evaluation of scaffold safety at construction sites," Journal of Safety Research, vol. 35, no. 2, pp. 141–150, 2004, doi: 10.1016/j.jsr.2003.11.004.

[16] A. Hola, B. Hola, and M. Szóstak, "Analysis of the causes and consequences of falls from scaffolding using the Polish construction industry as an example," 2017. doi: https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012050.

[17] A. Hola, M. Sawicki, and M. Szóstak, "Methodology of Classifying the Causes of Occupational Accidents Involving Construction Scaffolding Using Pareto-Lorenz Analysis," Applied Sciences, vol. 8, no. 1, 2018, doi: 10.3390.

[18] M. Sáez Abellán, Evaluacion De Riesgos Laborales En El Uso De Los Andamios Más Comunes En Construcción. [Tesis de Maestría, Universidad Miguel Hernández]. RediUMH, 2016. [Online]. Available: http://dspace.umh.es/bitstream/11000/3389/1/Saez Abellan%2C Mariano TFM.pdf

[19] M. Pieńko, E. Błazik-Borowa, A. Robak, and J. Szer, "Safety Conditions Analysis of Scaffolding on Construction Sites,"

International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 12, 2018, doi: 10.1999/1307-6892/10008521.

[20] el Mercurio, "Seguridad de los sistemas: el cumplimiento de la normativa en andamios es clave," Aug. 28, 2014. [Online]. Available: http://images.elmercurio.com/MerserverContents/PDFsLow/2014/ago/28/MERSTNA010CC2808_3g.pdf

[21] J. C. Rubio-Romero, M. Carmen Rubio Gámez, and J. A. Carrillo-Castrillo, "Analysis of the safety conditions of scaffolding on construction sites," Safety Science, vol. 55, pp. 160–164, 2013, doi: 10.1016/j.ssci.2013.01.006.

[22] P. Chronowski, M. Modares, and J. Mohammadi, "Data-driven investigation into causes of collapse in scaffolds," Practice Periodical on Structural Design and Construction, vol. 22, no. 2, pp. 3–7, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000310.

[23] J. Desai, Dr. J. Pitroda, and J. Bhavsar, "SCAFFOLDING: SAFETY AND ECONOMICAL ASPECT FOR SCAFFOLDINGS IN CONSTRUCTION INDUSTRY," 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281493982_SCAFFOLDING_SAFETY_AND_ECONOMICAL_ASPECT_FOR_SCAFFOLDINGS_IN_CONSTRUCTION_INDUSTRY

[24] G. P. Cimellaro and M. Domaneschi, "Stability analysis of different types of steel scaffolds," Engineering Structures, vol. 152, pp. 535–548, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.07.091.

[25] Línea de prevención, "Guía sobre los requisitos técnicos para equipos empleados en trabajos temporales en altura. Fase II," 2011. http://www.lineaprevencion.com/ProjectMiniSites/IS35/html/2-1-2/2_1_2_1.html

[26] Latino Worker Safety Center, Protección Contra Caídas en la Construcción. El Obrero Latino, 2015. [Online]. Available: https://www.osha.gov/sites/default/files/2018-12/fy15_sh-27683-sh5_Fall_Prevention_Student_Workbook_Spanish.pdfhttps://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/wp-solutions/2014-124_sp/default.html

[27] A. L. Calpa Gómez, Manual De Análisis Comparativo Para La Implementación Y Montaje De Sistemas De Soporte Multidireccional Y Andamios De Carga. [Tesis de Licenciatura, Universidad Industrial de Santander]. DOCPLAYER, 2010. [Online]. Available: https://docplayer.es/17819718-Manual-de-analisis-comparativo-para-la-implementacion-y-montaje-de-sistemas-de-soporte-multidireccional-y-andamios-de-carga.html

[28] Occupational Safety and Health Administration, "Compendio del sector de la construcción." OSHA 3530-09R, 2014. [Online]. Available: https://www.osha.gov/Publications/osha3530.pdf

[29] W. K. Yu, K. F. Chung, and S. L. Chan, "Structural instability of multi-storey door-type modular steel scaffolds," Engineering Structures, vol. 26, no. 7, pp. 867–881, 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.02.006.

[30] H. Zhang, T. Chandrangsu, and K. J. R. Rasmussen, "Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems," Structural Safety, vol. 32, no. 6, pp. 393–401, 2010, doi: 10.1016/j.strusafe.2010.02.005.

[31] C. Kumar, S. M. AbouRizk, Y. Mohamed, H. Taghaddos, and U. Hermann, "Estimation and Planning Tool for Industrial Construction Scaffolding," Aug. 2013. doi: 10.22260/ISARC2013/0069.

[32] Saudi Aramco Construction, Scaffold Safety Handbook. Training and Career Development, 2003.

[33] Safe Work Australia, GENERAL GUIDE FOR SCAFFOLDS AND SCAFFOLDING WORK. 2014. [Online]. Available: www.swa.gov.au

[34] Geneva International Labour Office, Safety, health and welfare on construction sites: A training manual. Geneva, 1995.

[35] C. J. G. Campos and E. R. Turato, "Análisis de Contenido en Investigaciones que Utilizan la Metodología Clínico-Cualitativa: Aplicación y Perspectivas," Latino-am Enfermagem, 2009, Accessed: Jul. 02, 2022. [Online]. Available: www.eerp.usp.br/rlaewww.eerp.usp.br/rlae

[36] J. Guix Oliver, "El análisis de contenidos: ¿qué nos están diciendo?," Revista de Calidad Asistencial, vol. 23, no. 1, pp. 26–30, Jan. 2008, doi: 10.1016/S1134-282X(08)70464-0.

[37] M. C. Arbeláez and J. Onrubia, "Análisis bibliométrico y de contenido. Dos metodologías complementarias para el análisis de la revista colombiana Educación y Cultura," Revista de Investigaciones UCM, vol. 14, no. 23, pp. 14–31, 2014, [Online]. Available: https://bit.ly/31A2xbH

[38] M. Khabsa and C. L. Giles, "The Number of Scholarly Documents on the Public Web," PLOS ONE, vol. 9, no. 5, p. e93949, May 2014, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0093949.

[39] T. Reller, "2014 RELX Annual Reports and Financial Statements," RELX Group, 2015, Accessed: Jul. 02, 2022. [Online]. Available: http://www.relxgroup.com/investorcentre/reports%202007/Documents/2014/relxgroup_ar_2014.pdf

[40] "About ASCE Publications | ASCE Library," 2022. https://ascelibrary.org/about (accessed Jul. 02, 2022).

[41] I. Oliver Faubel, "Medios auxiliares en obras de edificación: andamios de trabajo," 2017.

PySVAE: "A Simple Python code for soil Vibration Analysis for Earthquake Engineering."

Cristhian Caballero
Technological University of Panama
Seismic Engineering Research Group (GIIS)
David, Panama
cristhian.caballero2@utp.ac.pa

Bruno Moreno
Technological University of Panama
Seismic Engineering Research Group (GIIS)
David, Panama
bruno.moreno@utp.ac.pa

Stephania Rodriguez
Technological University of Panama
Seismic Engineering Research Group (GIIS)
David, Panama
stephania.rodriguez@utp.ac.pa

Jose Gallardo
Technological University of Panama
Seismic Engineering Research Group (GIIS)
David, Panama
jose.gallardo@utp.ac.pa

***Abstract*—PySVAE is a Python code used for soil vibration analysis, the code's utility is focused on simplicity, as well as the accuracy of the processing and coding optimization. PySVAE focuses on H/V spectral ratio analysis in which the peak frequency value is needed, this code is also a practical approach for researchers studying earthquake engineering, specifically peak frequency determination. The code emerged from the need of a simple and consolidated tool for this analysis, without the need of deep programming knowledge. The requirements needed for the analysis are 3 data files: one for each axis, from an accelerometer or a geophone and the sample frequency of the measured data; the processing gives as result the peak frequency value and the smoothed graph for the given data. The final version of this Python code was assessed with preliminary versions and validated through data of zonal peak frequencies. PySVAE showed a satisfactory result during tests by giving realistic, representative values, and accceptable execution times corresponding to the implemented coding optimization, and code reduction.**

Keywords—Earthquake engineering, Fourier transform, frequency, Python, soil vibration, spectral ratio.

I. Introduction

This paper presents the PySVAE python code, whose goal is to create an easy-to-use code for soil vibration analysis purposes, which will lead to obtaining a maximum frequency value and a smoothened frequencies graph for given seismic data. A calculated and plotted frequency value will be obtained from revised data using Fourier transform and plotted after smoothing. The code was assessed with preliminary versions, used for almost a year to analyze collected seismic data and was contrasted with existing spectral ratio documentation.

A. Referential Framework

It is known that there is a relation between the H/V peak frequency and the site frequency. The horizontal-to-vertical spectral ratio is the rate between the Fourier amplitude of the horizontal and the vertical component of microtremors and was first introduced by Nogoshi & Igarashi [1], and widespread by Nakamura [2].

The H/V spectral ratio based in the analysis of ambient noise in a soil deposit evaluates site effects, resulting in the natural resonance frequency of the site, which corresponds to the highest peak of H/V spectral ratio amplitude reached [3].

The current Project is funded by SENACYT.

B. Seismic Analysis International Context

Given the importance of the H/V spectral ratio method and its acceptance, a consensus was reached among the frame of the European research project SESAME. Participants of SESAME *(Site Effects Assessment Using Ambient Excitations)* worked for three years to present the Guidelines for the implementation of "H/V spectral ratio technique on ambient vibrations", the document compiles recommendations to be applied when studying ambient vibrations [4].

The processing software J-Sesame is a java application developed for the H/V technique for organizing data, processing, and displaying the results [4]. The main functionalities include Fourier transform calculation, smoothing, merging horizontal components, H/V calculation and standard deviation.

Geopsy is an open-source software for geophysical research and application, developed during the European research project SESAME [5]. It provides tools for processing ambient vibrations and is not limited to H/V spectral ratio, since it also includes other techniques such as MASW and refraction. Its functionalities include viewing signals, H/V spectral ratio, MASW experiment and dispersion curve computation for surface waves.

C. Python Codes for Seismic Analysis

There are several sources regarding seismic analysis using Python.

ObsPy is an open-source python framework for processing seismic data. It offers a set of tools that let the user conduct a variety of approaches for seismic data processing and allows seismic time series manipulation from common file formats, access to data centers and routines processing.

hvsrpy is a python package for horizontal-to-vertical spectral ratio processing that provides a wide set of tools. This package was developed at the University of Texas and holds features that are not available in any commercial open-source software, such as an automatic checking of SESAME peak reliability and clarity.

II. Python Programmming Language

Python is an open-source programming language, with an easy, clear, and simple syntaxis [6]. It is a general-purpose programming language. It outstands specially in education

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00032

and science as an easy to learn and open-source software; free to use, execute, distribute, and modify and a license that allows open and privative software distribution [7].

Python was conceived as an easy to learn language, good for either introductory or advanced courses. In science, Python represents a valuable tool in problem solving, since it allows focusing on the problem-solving part saving the programming and compiling time other programming languages would require.

A. Popularity Ranking

The TIOBE index indicates programming languages popularity based on skilled engineers, courses and vendors using the language [8]. The PYPL Index analyzes how often tutorials are searched on Google for a certain programming language, giving an indicator on which programming languages are more relevant at a given time [9]. By July 2022 Python was ranked as first in popularity for both indexes.

B. Seismic Applications in Python

In Python, libraries such as NumPy, SciPy, and Matplotlib allow to effectively use Python for scientific computing applications [10]; along with specialized packages such as ObsPy or hvrspy, for seismic analysis.

As mentioned, ObsPy has a general set of tools, while hvsrpy is focused on H/V spectral ratio. PySVAE is based on the "H/V spectral ratio technique on ambient vibrations" from SESAME; by following mentioned data processing standards and keeping the procedures as simple as possible.

III. PySVAE Python Code

PySVAE came up from the need of processing field seismic data for site frequency estimation and make it quick and simple. The available data format was EVT, from ETNA accelerographs; first passed through a corrector, to take any constant external noise out of the signal and then be analyzed by PySVAE.

A. Reading Data

One CSV data file per each axis (X, Y, and Z) was read using the NumPy Python library by following a specified directory into the desired file.

B. Input Parameters

Analysis parameters were presented right above each code section. These parameters included the starting and ending time to consider from the file, maximum and minimum frequencies to be included in the smoothed graph, the bandwidth for the smoothing process, and the sample frequency for the recorded data.

C. Code Output

The output included printed text and graphs. It prints the amount of data in the file, the starting and ending times as well as each index from the data file, the window size, and the number of windows to be analyzed; the three graphs are plotted, for each axis, which represent the raw data.

The remaining output corresponded to the H/V spectral ratio graph after processing with Fast Fourier Transform and smoothing each window; also, the average of the frequency value of each of the windows analyzed, and the frequency value for the average of the windows. The smoothing uses the Konno & Ohmachi smoothing [11], recommended by SESAME [4].

D. Additional Features

For the Fast Fourier Transform the code used the pyfftw library, which allows multiprocessing when doing the transform. This multiprocessing is included in the code as an intent to reduce the execution time, which did not prove to be successful during tests.

IV. Methodology

PySVAE is a Python code conformed by about 80 lines of working code. Constructed with the intention of functionality and practicality. The simplicity intended makes it a great introduction into the seismic engineering and the site frequency determination, as well as the H/V spectral ratio technique.

A. Data Requirements

To successfully analyze seismic data there is some requirements for that data to be processed. The code will analyze the data as it is, there is no adjustments on the data before processing. Therefore, if there is any continual noise it must be revised previously by another software.The data format must be a CSV, TXT file or any similar format. Also, the Z (vertical) axis must be the last file to name, otherwise the outcome will be affected. Additionally, the data file should be in the same folder as the Python code, or the data file directory must be specified, where the data graph shows the full directory as title instead of the file name.

B. Libraries

There are three libraries that the code works with, libraries import is shown in Figure 1.

```
1   #Import libraries
2   import numpy as np
3   import matplotlib.pyplot as plt
4   import pyfftw as fftw
```

Fig. 1. Import libraries.

- NumPy (np): Used to read the files, as well as to create the arrays that will hold the data during the processing, allows to work with these arrays adding elements into a list, converting lists into arrays, fill an array with a given element, deleting its content, or finding the maximum value index in the array.
- Matplotlib (plt): The plotting library includes creating the graphs and setting titles, labels, and limits; as well as saving the figures into the file where the code is located and showing it while the code is running.
- PyFFTW (fftw): The Fast Fourier Transform library considerers the input array which is the data array for the current window, and the output array which is the transformed array and has a length equal to half of the input array.

C. Input Parameters

Input includes de "Data files" (data_x, data_y, data_z), analysis parameters and the graph format settings. Data files corresponds to the name of each data file or directory, being X and Y the horizontal axes and Z the vertical one. For data files, the default names 'data-X', 'data-Y' and 'data-Z' are replaced, where the vertical axis corresponds to Z."Graph format" includes line color and font style, which will affect

shown graphs. By default, line color is set as ‘green’ and font as ‘times new roman’.

“Analysis parameters” will affect the analysis and the processing; changes in this parameter will also affect the output and are the ones for the user to judiciously assign. The parameters are:

- Sample frequency (sample_frequency): The frequency in which the data was recorded. A sample frequency of 100 Hz is common.
- Start time (time_start): The starting time from which the program should analyze the data; this will cut out the first part of the data.
- End time (time_end): The ending time until which the program should analyze the data; this will cut out the last part of the data.
- Window time (win_time): Time that each equally spaced window will cover from the remaining data since the time start and ending as close to the ending time as possible. There is no data overlap; every window will also have the same size, so any remaining data after the last time sized window will be cut out.
- Minimum Frequency (frequency_min): The minimum value considered when processing the data, and to be plotted in the smoothed graph. A minimum of 1 Hz is recommended, lower frequencies might need larger amounts of data to be successfully analyzed.
- Maximum Frequency (frequency_max): The maximum value considered when processing the data, and to be plotted in the smoothed graph. The maximum frequency should be lower or equal to half of the sample frequency.

D. Data Reading and Plotting

The program first reads the data and plots each file using the function plot from matplotlib.pyplot, which is called when a graph is going to be executed and saves a PNG image of the graph into the folder of the Python file.

There are also windows related parameters the program calculates to work with afterwards, including start and end of data, size of the windows, number of windows. These are included in “Plot definition” and “Setting windows”, shown in Figure 2.

```
#Plot definition
def plot(axis_y,xi,dx,xmin,xmax,title,xlabel,ylabel,line_color):
    axis_x=np.arange(xi,xi+dx*len(axis_y),dx)
    plt.plot(axis_x,axis_y,line_color)
    plt.title(title)
    plt.xlabel(xlabel)
    plt.ylabel(ylabel)
    plt.xlim([xmin,xmax])
    plt.grid(True)
    plt.savefig(title+".png")
    plt.show()

#Setting windows
files=[data_x,data_y,data_z]
data=[]
dt=1/sample_frequency
i_start=int(time_start*sample_frequency)
i_end=int(time_end*sample_frequency)
win_size=int(win_time*sample_frequency)
win_number=int((i_end-i_start)/win_size)
```

Fig. 2. Plot definition and Setting windows.

- Files (files): List than contains the data files names.
- Data (data): Empty list to store the data needed for plotting, which will not include the data before start time or after end time.
- Time differential (dt): The time difference for each data point, equal to the inverse of sample frequency.
- Start index (i_start): Index of the first data element, calculated by multiplying the time start and the sample frequency. A data number of zero represents the first value measured.
- End index (i_end): Index of the last data element, calculated by multiplying the end time and the sample frequency. It is the index of last data point used for plotting.
- Window size (win_size): Calculated by multiplying the window time and the sample frequency. Sizing data values that will be in each window.
- Window number (win_number): Calculated by using the integer part of dividing the difference between end index and start index, divided by the window size.

The previous parameters and the defined plot function are used in “Read files” on Figure 3 as well as the setting parameters listed below; the NumPy library is used to read the file, take the needed data according to the time delimitation, save it into the data list as array values; and the Matplotlib library plots the required data, for each file and saves a PNG image.

The following parameters are printed as a guide to the user.

- Data: Amount of data measured in the field.
- Data size: The amount of data for the remaining time.
- Window size, window data size, window number, time start, time end, data start, data end.

```
#Read files
for file in files:
    axis_y=np.genfromtxt(file,delimiter='',dtype=None)
    data.append(np.array(axis_y[i_start:i_end]))
    plot(data[len(data)-1],time_start,dt,time_start,time_end,file,'Time, t (s)','Data',line_color)

#Print setting parameters
print('Data =',axis_y.size,' ','Data size =',axis_y[i_start:i_end].size)
print('Window size =',win_time,'s',' ','Window data size =',win_size,' ','Windows =',win_number)
print('Time start =',time_start,'s ','Time end =',time_end,'s')
print('Data start =',i_start,' ','Data end =',i_end)
```

Fig. 3. Read files and Print setting parameters.

E. Processing Setting

For the Fourier Transform the pyfftw.FFTW function is used in “Setting Fast Fourier Transform” section of the code.

An array called d_x stores the starting and ending index number for the data value delimitation in each window, an empty list called spectral_ratios and the definition of the output and input arrays that the pyfftw.FFTW function uses for the Fast Fourier Transform, which represents a 1D Fast Fourier Transform.

The smoothing executed for the Fast Fourier Transform resulting array based on the “Smooth parameters” includes “Setting ranges”, “Setting smooth” and “Setting Konno & Ohmachi”.

The smoothing parameters are constant values that can change for different results, which might improve the smoothing. Changing these values is not recommended without a proper knowledge on how the smoothing method works, since wrong values might worsen the smoothing.

- Index zoom (index_zoom): resolution for the smoothing, a higher value uses more intermediate values when the smoothing is executed. Increasing this value implies more time to execute, the default value is 1e06.
- Bandwidth parameter (bandwidth): Factor used by Konno & Ohmachi smoothing function, a bandwidth parameter of 40 is recommended.
- Lower limit (lower_lim): starting point for the weight array in the Konno & Ohmachi smoothing. The lower limit default value is $10^{-\pi/b}$, where b is the bandwidth parameter.
- Upper limit (upper_lim): ending point for the weight array in the Konno & Ohmachi smoothing. The upper limit default value is $10^{\pi/b}$, where b is the bandwidth parameter.

In the "Setting ranges" section, HVy is a list to store the transform values. HVy_min and HVy_max are the index of the amplitude values that correspond to minimum and maximum frequencies respectively. The processing settings of setting Fast Fourier Transform, Smooth parameters and Setting ranges are shown in Figure 4.

```
#Setting Fast Fourier Transform
d_x=[i*win_size for i in range(win_number)]
spectral_ratios=[]
output=np.empty(int(win_size/2+1),dtype='complex128')
input_array=np.empty(int(win_size),dtype='float64')
fft=fftw.FFTW(input_array,output)

#Smooth parameters
index_zoom=1000000
bandwidth=40
lower_lim=10**(-np.pi/bandwidth)
upper_lim=1/lower_lim

#Setting ranges
HVy=[]
HVy_min=int(frequency_min*win_time)
HVy_max=int(frequency_max*win_time)
```

Fig. 4. Setting Fast Fourier Transform, Smooth parameters and Setting ranges.

In the "Setting smooth" section, HVy_smooth creates a group of three arrays (one for each axis of analyzed data), with a size that corresponds to the maximum index needed to store the results up to the maximum frequency of interest (frequency_max) and filled with ones. The array named f_fc_list stores the frequency quotiens (frequency-to-central frequency ratio, f/fc) according to the Konno & Ohmachi smoothing function; this is coded as shown in Figure 5.

In the "Setting Konno & Ohmachi" section, the weight is calculated for each index. The weight values are calculated as the Sin of the argument divided by the argument; the argument is the bandwidth parameter multiplied by the base ten logarithm of the current frequency quotient (frequency-to-central frequency ratio, f/fc).

```

#Setting smooth
HVy_smooth=np.ones([3,HVy_max])
weight=np.ones(int(index_zoom*upper_lim+1))
f_fc_list=np.arange(lower_lim,upper_lim,1/index_zoom)
f_fc_list=np.delete(f_fc_list,int((1-lower_lim)*index_zoom))

#Setting Konno & Ohmachi
for f_fc in f_fc_list:
    argument=bandwidth*np.log10(f_fc)
    index=round(f_fc*index_zoom)
    weight[index]=np.power(np.sin(argument)/(argument),4)

```

Fig. 5. Setting smooth and Konno & Ohmachi.

F. *Processing Execution*

The last part of the code is the execution of the analysis: the Fast Fourier Transform and the smoothing for each window; as well as the print for the obtained frequency value, and the final smoothed graph showing the frequency pattern.

In the "Fast Fourier Transform and Konno & Ohmachi smoothing" section of Figure 6, the analysis runs four nested 'for' cycles. The outer cycle runs for each of the windows in which the data is divided, the second runs once for each of the three axis and executes the absolute of the Fast Fourier Transform for each of them, the third cycle runs through each frequency of interest, setting it as central frequency for which the smoothing is going to be done, and the inner cycle runs the Konno & Ohmachi smoothing using the weight array and the transformed data.

During the second cycle, the arrays for each smoothed data for the three axes of the current window are unified in a list called spectral_ratio, and frequency_sum (an accumulator of the value of peak frequency) is updated with each new window analyzed.

```
#Fast Fourier Transform and Konno & Ohmachi smoothing
frequency_sum=0
for a in range(win_number):
    for b in range(3):
        fast_fourier=abs(fft(input_array=data[b][d_x[a]:d_x[a]+win_size]))
        for c in range(HVy_min,HVy_max):
            sum_weight=0.
            sum_amp=0.
            for d in range(int(lower_lim*c),int(upper_lim*c)):
                f_fc=d/c
                index=round(f_fc*index_zoom)
                weight_temp=weight[index]
                sum_amp+=fast_fourier[d]*weight_temp
                sum_weight+=weight_temp
            HVy_smooth[b][c]=sum_amp/sum_weight
    spectral_ratios.append(np.sqrt(HVy_smooth[0]*HVy_smooth[1])/HVy_smooth[2])
    frequency_sum+=np.argmax(spectral_ratios[a])/win_time
```

Fig. 6. Fast Fourier Transform and Konno & Ohmachi smoothing.

In the "Smoothed data" section, the spectral ratios stored during the analysis are averaged, resulting in a final array containing the representative smoothed frequencies graph for the analyzed data. The average of the spectral ratios for all the windows, with each window representing the unified smoothed data of the three axes in the range the window covers.

In the "Print frequency and smoothed graph" section, the averages window frequency and the maximum frequency from the graph are calculated and printed, and the smoothed graph is plotted and saved as a PNG image inside the Python code folder. The code for smoothed data and print frequency and smoothed graph sections is shown in Figure 7.

```
#Smoothed data
for i in range(len(spectral_ratios[0])):
    spectral_average=sum(spectral_ratio[i] for spectral_ratio in spectral_ratios)/win_number
    HVy.append(spectral_average)

#Print frequency and smoothed graph
print('Average window frequency =',round(frequency_sum/win_number,3),'Hz')
print('Maximum frequency from graph =',np.argmax(HVy)/win_time,'Hz')
plot(HVy,0, 1/win_time,frequency_min,frequency_max,'H_V Spectral Ratio','Frequency, f (Hz)','Amplitude',line_color)
```

Fig. 7. Smoothed data, and Print frequency and smoothed graph.

The 'Average window frequency' calculates the average of the peak frequency values estimated from each time window. The 'Maximum frequency from graph' searches for the peak value from the final graph (which is a graph done with the averages of the graphs for each time window) and gets its corresponding frequency value in Hertz. The 'H_V Spectral Ratio' graph is the plotting of the average spectral ratio for all windows, in the delimited frequency range, using the data within the starting and ending times.

V. Testing

The data for two different locations, were vibration frequencies estimated from previous research [12] and analyzed using PySVAE. This was done during the programming process to verify the code was working while being written.

The data location is determined by the first 7 characters that corresponds to the coordinates where the data was measured and represents the Geohash precision. Since the zone is in the D1 Geohash, the next 5 characters are the ones used to name the file after the 'r' prefix that represents corrected data: as well as date and number.

A. Location

The first file named rMRUQ2-20220504-01-X measured at 8.4286 latitude and -82.4297 longitude, with the Geohash D1MRUQ2. The second file named rMRUND-20220504-01-X measured at 8.4305 latitude and -82.4375 longitude, with the Geohash D1MRUND. Both data files measured in the corregimiento of David, are shown in Figure 8 and Figure 9, respectively.

Fig. 8. File rMRUQ2-20220504-01-X. (https://www.movable-type.co.uk/scripts/geohash.html)

Fig. 9. File rMRUND-20220504-01-X. (https://www.movable-type.co.uk/scripts/geohash.html)

B. Data Format

The files used for testing were corrected data; corrected meaning that any external noise, that clearly is not part of the soil signal was filtered. The data format used for the test covers positive and negative values in the magnitude order of 1e-05.

C. Input Parameters

The input parameters change only included the data files; the analysis parameters do not change at all during the tests. Figure 10 and Figure 11 show the input parameters used for the files rMRUQ2-20220504-01-X and rMRUND-20220504-01-X respectively.

```
#Data files
data_x='rMRUQ2-20220504-01-X.001'
data_y='rMRUQ2-20220504-01-X.002'
data_z='rMRUQ2-20220504-01-X.003'

#Analysis parameters
sample_frequency=100.
time_start=30.
time_end=1230.
win_time=120.
frequency_min=1.
frequency_max=20.

#Graph format
line_color='green'
font={'family':'times new roman'}
plt.rc('font',**font)
```

Fig. 10. Input parameters. (rMRUQ2-20220504-01-X)

For both files, the “Data files” where specified according to the file name, with the file and program directory being the same. The “Graph format” used was ‘green’ for line color and ‘times new roman’ as the font for the graph labels and titles.

For the “Analysis parameters” both files share the same parameters since the testing objective was the comparison between codes and not the data analysis. The sample frequency for which the data was recorded is 100 Hz. The frequency minimum to show in graph was 1 Hz, considering zero as a non-realistic value to consider in soil vibration analysis, excluding low frequencies that should be analyzed differently; and frequency maximum to show in graph was 20 Hz, this is an arbitrary value larger than frequencies known for soils in the region of study, and considering a value below the 50 Hz limit that implies taking samples at 100 Hz.

```
#Data files
data_x='rMRUND-20220504-01-X.001'
data_y='rMRUND-20220504-01-X.002'
data_z='rMRUND-20220504-01-X.003'

#Analysis parameters
sample_frequency=100.
time_start=30.
time_end=1230.
win_time=120.
frequency_min=1.
frequency_max=20.

#Graph format
line_color='green'
font={'family':'times new roman'}
plt.rc('font',**font)
```

Fig. 11. Input parameters. (rMRUND-20220504-01-X)

The minimum runtime from which both files were recorded was 1260 seconds; the time start, and time end were set at 30 seconds and 1230 seconds respectively, cutting 30 seconds in each side in case of alterations when the sensor was set. The window time was 120 seconds, this is a large enough value according to SESAME [5], and considering ten windows is an acceptable value for tests.

D. Additional Considerations

No other section of the code was changed during the tests, and no change should be made in those sections for data analyze purposes. The code shows a representative smoothed graph and its corresponding value of the peak frequency. The improvements correspond to the processing and its execution.

VI. Results

The results from the comparison included the graph of the data files, the print of the window settings used, the smoothed graph representing the site vibration amplitudes and the print of the peak frequency values.

The data graph is shown in Figure 12 and Figure 13, for files rMRUQ2-20220504-01-X.001 and rMRUND-20220504-01-X.001 respectively, 001 being the file for the X axis; only one axis is shown.

A. Printed Window Settings

The printed window settings for rMRUQ2-20220504-01-X and rMRUND-20220504-01-X are shown in Table I.

TABLE I. Printed window settings for rMRUQ2-20220504-01-X and rMRUND-20220504-01-X

Setting parameter	*Value*
Data	126301
Data size	120000
Window size	120.0 s
Window data size	12000
Windows	10
Time start	30.0 s
Time end	1230 s
Data start	3000
Data end	123000

B. Data Graph

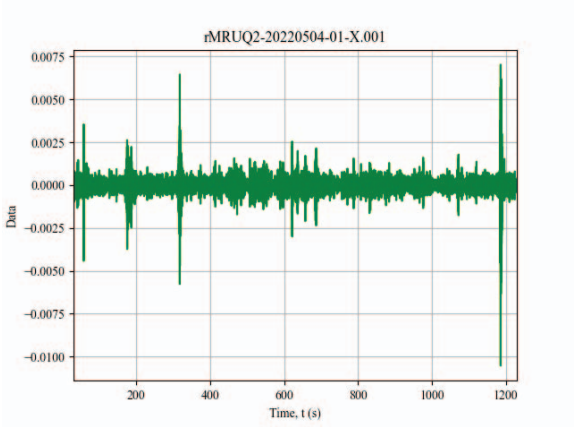


Fig. 12. rMRUQ2-20220504-01-X.001 data graph.

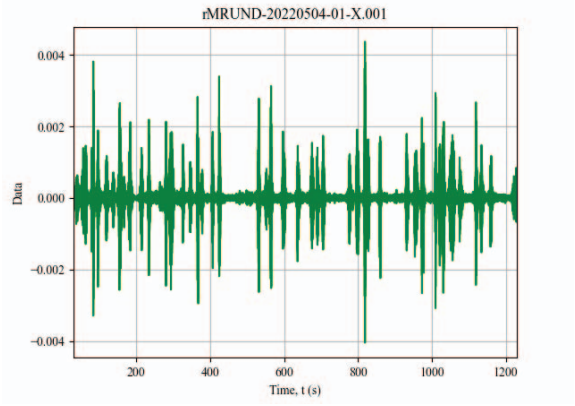


Fig. 13. rMRUND-20220504-01-X.001 data graph.

C. Smoothed Graph

The 'H_V Spectral Ratio' smoothed graph is shown in Figure 14 and Figure 15, for rMRUQ2-20220504-01-X and rMRUND-20220504-01-X, respectively.

D. Printed Peak Frequency

The printed peak frequency values for rMRUQ2-20220504-01-X and rMRUND-20220504-01-X shown in Table II.

TABLE II. PRINTED PEAK FREQUENCY VALUES FOR RMRUQ2-20220504-01-X AND RMRUND-20220504-01-X

Printed Peak Frequency		
Setting	***rMRUQ2-20220504-01-X***	***rMRUND-20220504-01-X***
Average window frequency	8.471 Hz	6.71 Hz
Maximum frequency from graph	8.467 Hz	6.575 Hz
Estimated from previous studies	8 Hz	6.2 Hz

The 'average window frequency' calculated as the summation of the peak frequency value of all windows divided by the number of windows analyzed. The 'maximum frequency from graph' is the peak frequency in the smoothed graph for which the amplitude is the highest.

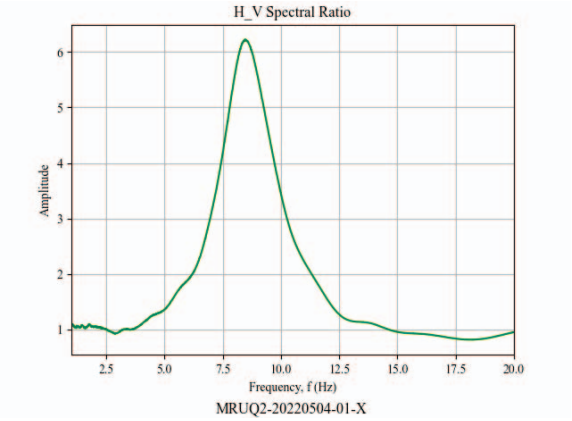


Fig. 14. rMRUQ2-20220504-01-X H_V Spectral Ratio.

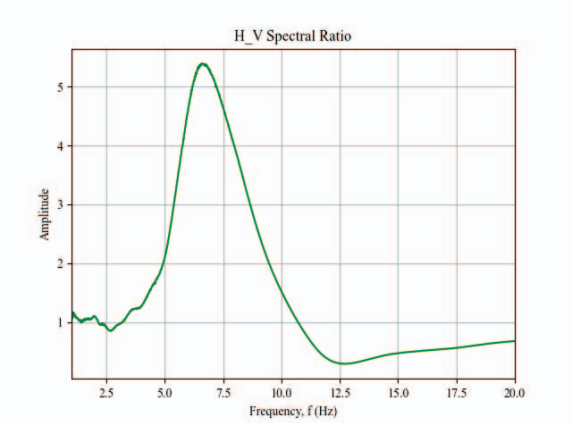


Fig. 15. rMRUND-20220504-01-X H_V Spectral Ratio.

VII. Discussion

The printed peak frequency values consider the variation between the 'average window frequency' and the 'maximum frequency from graph' for each code. In the first test PySVAE presents a variation of 0.469 Hz for the results. In the second test there is a variation of 0.4425 Hz; this is the variation between the average of both peak values obtained in PySVAE and the frequency estimated from previous studies.

Values obtained using PySVAE, either with the average of the peak frequency from all windows method or with the peak frequency of the average graph method, differs less than 0.5 Hz from values estimated in previous research; this is not a significant variation in terms of frequency for soil vibration studies, considering a range of 4 to 9 Hz for points from previous studies in the zone where the test data was measured.

VIII. Future Research Lines

Since the presented Python is a simplicity-oriented code, future research lines include the addition of more functions, looking for an advanced analysis-oriented code. There are additional functions which might be interesting to explore and potentially implement for the code and the user, as well as the code execution and its capabilities.

In the user-oriented functions there is the possibility to print each output information into a text file instead of the terminal in the programming interface, the customization of each graph as a group or separately and the parameters input as a text file.

For the code execution implementing a wisdom parameter for the Fast Fourier Transform process, which would save the execution for new runs of the same data, as well as multiprocessing supported by the PyFFTW library; this would improve the time to run when the same data is analyzed for different analysis parameters.

The code capabilities can extend by adding a data corrector to take out ambient noise, the code evaluation for massive amounts of data, for easier optimization and programming errors identification. There is also the programming optimization reviewed by a programming specialist; for coding improvement as well as the identification of coding mistakes that might interfere with the correct execution.

IX. Conclusions

The values of PySVAE represent realistic peak frequency values for a soil vibration analysis, the variations from estimations from previous research are small, in the order of 0.46 Hz. This endures de code validity for soil vibration analysis by giving realistic values with a small variation.

The length of PySVAE (113 lines) is an advantage for non-programming engineers who want to use the code for vibration data analysis and grasp the essentials of it, without the need of reading an extensive code.

Acknowledgment

The current Project is funded by SENACYT and realized by the Seismic Engineering Research Group (GIIS) at the Technological University of Panama. Additional thanks to Abner Caballero, for the programming orientation and the advice on improving the code's functionality.

References

[1] M. Nogoshi and T. Igarashi, "On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2)," *Journal of the Seismological Society of Japan*, vol. 24, pp. 26–40, 1971.

[2] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface," *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, vol. 30, no. 1, 1989.

[3] A. K. Escalona, "Determinación de la Vs 30 a través del cálculo de razón espectral H/V," Universidad del Bío-Bío, Chile, 2016.

[4] P.-Y. Bard *et al.*, "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 6, pp. 1–2, Mar. 2008.

[5] M. Wathelet *et al.*, "Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing," *Seismological Research Letters*, vol. 91, no. 3, pp. 1878–1889, Apr. 2020, doi: 10.1785/0220190360.

[6] R. González, "Python para todos." Creative Commons Reconocimiento, 2011.

[7] I. Challenger, Y. Díaz, and R. A. Becerra, "El lenguaje de programación Python," *Ciencias Holguín*, vol. 20, no. 2, pp. 1–13, 2014.

[8] "TIOBE Index," *TIOBE Index for July 2022*, Jun. 03, 2022. https://www.tiobe.com/tiobe-index/

[9] "PYPL Popularity of Programming Language index," 2022. https://pypl.github.io/PYPL.html

[10] J. K. Millman and M. Aivazis, "Python for Scientists and Engineers," *Computing in Science & Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 9–12, Apr. 2011, doi: 10.1109/MCSE.2011.36.

[11] K. Konno and T. Ohmachi, "A smoothing function suitable for estimation of amplification factor of the surface ground from microtremor and its application," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1995, no. 525, pp. 247–259, 1995.

[12] A. Hedlund, S. Sivars. Microzonation Study in David, Panama. El Real Instituto de Tecnología de Estocolmo Suecia.Tesis. Jun. 1999.

Lateral Capacity of Piles in Clayey Soils with Bilinear Strength Profile

Capacidad Lateral de Pilotes en Suelos Arcillosos con Perfil de Resistencia BiLineal

Francisco Grajales-Saavedra
School of Civil Engineering
Universidad Tecnologica de Panamá
Panama, Republic of Panama
francisco.grajales@utp.ac.pa

Yesica Yau
Experimental Engineering Center
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Republic of Panama
yesica.yau1@utp.ac.pa

***Abstract*—In Panama, the structural design regulations (REP) tends to design the foundations in terms of axial capacity, this in order to bear static loads. However, the piles are exposed to the action of dynamic loads such as wind thrusts and seismic effects; therefore, it is necessary to quantify the effects of lateral loads on the piles. Existing methods that compute the capacity of laterally loaded piles are developed for homogeneous soil profiles. An existing method has been modified to generate an ultimate lateral capacity estimation model for stratified clay soils with bilinear shear strength profiles, based on the upper bound plastic limit analysis methodology. Accordingly, a parametric study has been carried out to establish the prediction sensitivity of the model to the variation of parameters of the soil-pile system. The sensitivity of the model depends on the variation of the depth at which the slope changes in regard to the diameter of pile; It is concluded that, at depths equivalent to twice the diameter, the prediction is entirely correct. A subsequent implementation of the simplified methodology based on the empirical function of [1] is expected, for a comparison between the traditional method and the simplified method.**

***Keywords*—Lateral bearing capacity, bilinear distribution, piles, shear strength**

***Resumen* — En Panamá, la normativa de diseño estructural (REP) se ajusta a la tendencia por el diseño de fundaciones en términos de capacidad axial, esto con la finalidad de soportar cargas estáticas. Sin embargo, los pilotes se exponen a la acción de cargas dinámicas tales como empujes de viento y efectos sísmicos; por esta razón, es necesario cuantificar los efectos de las cargas laterales sobre los pilotes. Los métodos existentes para el cálculo de capacidad lateral de pilotes están desarrollados para perfiles de suelos homogéneos. Se ha modificado un método existente para la formulación de un modelo de estimación de capacidad lateral máxima para suelos arcillosos estratificados con perfiles de resistencia al corte bilineal, basado en la teoría de análisis plástico de estado límite. En este sentido, se ha realizado un estudio paramétrico con el objetivo de establecer la sensibilidad de predicción del modelo ante la variación de propiedades del sistema suelo – pilote. La sensibilidad del modelo depende de la variación de la profundidad en que cambia el gradiente con respecto al diámetro del pilote; se concluye que, en profundidades equivalentes al doble del diámetro, la predicción es acertada en su totalidad. Se espera una posterior implementación de la metodología simplificada con fundamento en la función empírica de [1], para una comparación entre el método tradicional y el método simplificado.**

Palabras claves —Capacidad de soporte lateral, distribución bilineal, pilotes, resistencia al corte

I. Introducción

En general, se tiene la idea de que los perfiles de esfuerzos aumentan en forma lineal con respecto a la profundidad, sin embargo, no siempre es el caso; un ejemplo de esta situación se da en el suelo estratificado tipo "corteza" como el de la Fig. 1a, en el cual la resistencia al corte es mayor en el primer estrato, luego disminuye de manera abrupta en la zona de transición y finalmente vuelve a incrementar [2].

Existe también la probabilidad de que se encuentren suelos con partículas sedimentarias que constituyen un estrato de suelo suave y este cubra a un estrato de suelo rígido [3], este tipo de perfil presenta una distribución de esfuerzos tipo "escalonado", tal como se muestra en la Fig. 1b.

En este artículo se investiga el caso de un perfil de resistencia al corte no drenada bilineal, el cual se muestra en la Fig. 2, en donde cada estrato presenta un aumento lineal con pendientes distintas, cuya configuración es representativa de condiciones encontradas en campo mediante pruebas in-situ.

Comprende el desarrollo de un estudio paramétrico para evaluar la aplicabilidad del método tradicional de análisis plástico de estado límite, en particular la teoría de límite superior en perfiles de capacidad de soporte lateral *Nps* para perfiles bilineales de resistencia al corte no drenada.

Se modifica el código existente en Matlab, disponible para perfiles de suelo con corteza, desarrollado por [4], de modo que sea aplicable a suelos arcillosos estratificados con perfiles de resistencia bilineal.

En el estudio paramétrico se analizan pilotes sometidos a diversas condiciones de suelos arcillosos, para determinar las variables que tienen mayor influencia en el comportamiento de la resistencia lateral.

El objetivo general de esta investigación consiste en presentar un modelo sistematizado con base en el método de análisis plástico con el teorema de límite superior [1], el cual permita estimar la capacidad máxima de un pilote sometido a cargas laterales en suelos estratificados con distribución de resistencia bilineal.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00033

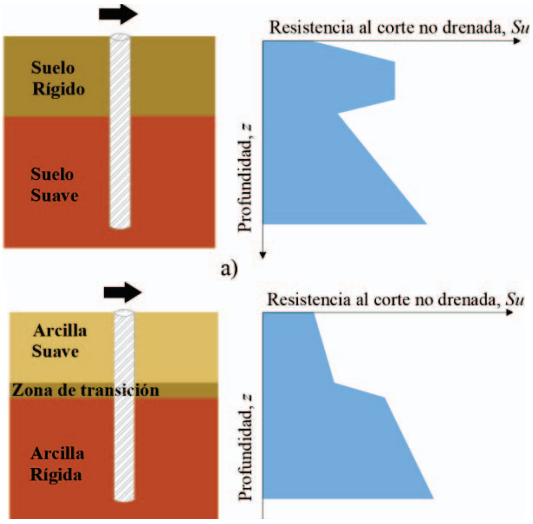


Fig. 1. Perfiles no-lineales: (a) perfil con corteza y (b) perfil escalonado. Redibujado a partir de [2], [3].

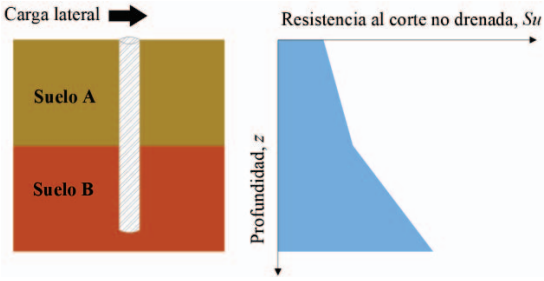


Fig. 2. Ejemplo de un perfil bilineal, sujeto de este estudio.

II. Método de Murff Hamilton

A. Descripción del Modelo

El estudio se basa en el modelo de [1], el cual utiliza el método de límite superior del análisis plástico de estado límite para la estimación de la carga de colapso de un pilote con cargas laterales, lo que permite la solución de la resistencia última unitaria del suelo a lo largo del pilote.

Se asume un mecanismo de colapso tridimensional que consiste en un campo de velocidades completo con restricciones cinemáticas. Las restricciones constan de condiciones de borde de desplazamiento o velocidad y las relaciones de cambio de volumen y corte involucradas por condiciones de cedencia y regla de flujo.

El trabajo externo que realizan las cargas aplicadas, incluyendo la carga desconocida de colapso, se iguala a la disipación total de energía plástica. La carga desconocida se resuelve con la ecuación y se asegura que el resultado sea un límite superior a la solución exacta. Mediante los parámetros de optimización se garantiza la obtención del menor límite superior.

Los cuatro parámetros de optimización que definen la geometría del mecanismo de falla son: la extensión vertical de la cuña de falla z_0, se mide desde la superficie; la profundidad al centro de rotación L_0, influye en $L_0 = z_0/c$; la extensión radial de la cuña de falla r_0, se mide desde la línea central del pilote; el parámetro α_{opt}, se incluye en una ecuación que representa la velocidad radial de campo dentro de la cuña [4]. Dichos parámetros de optimización se pueden observar en la Fig. 3.

En la Fig. 3 se presenta un mecanismo de colapso lateral del suelo, donde se muestra una cuña de falla semi cónica (Fig. 3a) y una zona de flujo de deformación plana en vista de planta (Fig. 3b).

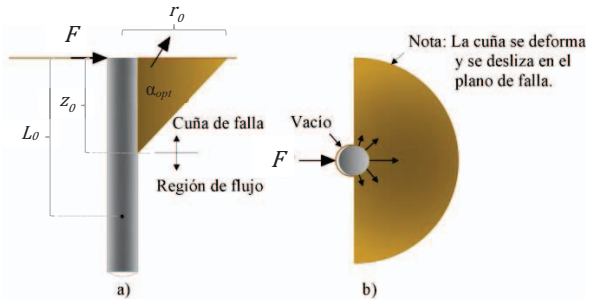


Fig. 3. Mecanismo de colapso del suelo. Redibujado a partir de [1].

La cuña de falla semi cónica se encuentra cerca de la superficie y es empujada hacia la superficie por el pilote (cuña de falla pasiva), tal como se muestra en la Fig. 3a, la cuña de suelo se mueve tangencialmente al límite de suelo rígido; el modelo considera la posibilidad de que el pilote se mueva en forma de rotación, traslación o ambas.

El modelo funciona tomando en consideración tanto la formación de un vacío como la succión en la parte trasera del pilote, en ese caso se forma una cuña de falla activa. En la zona de deformación plana se prevé que el suelo fluye en dirección horizontal alrededor de la circunferencia del pilote, ver Fig. 3b.

En la Fig. 4 se aprecia la localización de los términos de disipación total según la región de deformación en la que actúan. En el mecanismo de falla hay tres regiones idealizadas, a profundidades superficiales se encuentra una región de flujo de cuña cónica similar a la propuesta para el análisis de pilotes laterales de [1]. En esta zona, la velocidad vertical se reduce a cero, de tal manera que no se produce esfuerzo volumétrico.

La segunda región se conforma por un flujo restringido de suelo alrededor del cajón, en donde la presión neta en el cajón se asemeja a la presión de límite para un cilindro que se mueve a través del suelo [5], [6].

La tercera región se encuentra en la zona de la base del cajón, donde se encuentra el centro de rotación. La superficie es convexa vista desde el ángulo inferior, cuando el centro de rotación está por encima de la base del cajón; mientras que, si está por debajo de la base, la superficie es cóncava.

Como se puede observar en la Fig. 4, el término $\dot{D}_1$ corresponde a la disipación total dentro de la cuña, $\dot{D}_2$ es la disipación total en la superficie de falla, $\dot{D}_3$ es la disipación total según adhesión entre cajón y suelo, $\dot{D}_4$ es la disipación total por encima del centro de rotación del mecanismo mientras que $\dot{D}_5$ es la disipación debajo del centro de rotación y $\dot{D}_6$ es la disipación sobre la punta del pilote.

Los términos del trabajo externo consisten en la traslación de cargas y la rotación de momentos en la cabeza del pilote. La carga desconocida de la cabeza del pilote puede ser una sola carga lateral o un factor que relaciona carga y momento. De modo que se obtiene la siguiente ecuación:

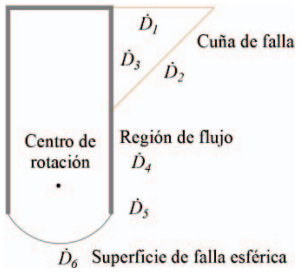


Fig. 4. Regiones correspondientes a cada término de tasa de disipación. Redibujado a partir de [4].

$$Fv_0 = \dot{D}v_0 - \dot{W}v_0 \qquad (1)$$

En (1), la variable F representa la carga desconocida, la cual puede ser una carga lateral, un factor de escala o un momento. $\dot{D}$ es la tasa de disipación interna total y $\dot{W}$ es la tasa de trabajo externo total, donde se excluye la carga desconocida.

En (1) se cancela el término de velocidad virtual v_0, y se resuelve la ecuación, obteniendo la solución de F; los parámetros de optimización permiten la obtención de la mejor solución, la cual consiste en el menor valor de F [1].

La traslación o rotación en el pilote es independiente en la resistencia lateral; ya que, en sus análisis, los perfiles de resistencia unitaria versus profundidad resultan idénticos, hecho que concuerda con los hallazgos de [7].

La succión en la parte trasera del pilote genera una cuña de falla activa en esta zona, lo cual incrementa la resistencia unitaria al doble a una profundidad de falla de cuña. Los análisis que consideran la succión atrás del pilote generan cuñas más superficiales, debido a que la resistencia unitaria aumenta cerca de la superficie y ocasiona que la deformación plana se obtenga a profundidades más superficiales.

El efecto de la adhesión entre suelo y pilote es significativo, pues añade un 20 a 30% de resistencia unitaria; en la Fig. 5 se aprecia este efecto en el perfil de resistencia. En el estudio solo se considera la adhesión a lo largo de la parte frontal del pilote; sin embargo, existe tanto adelante como atrás del pilote.

B. Implementación del Modelo en Matlab

El código se implementa de manera numérica mediante una función llamada fmin de Matlab, esta función utiliza un algoritmo tipo simplex para llevar a cabo la optimización, obteniendo así un valor mínimo iterado para F.

Los valores de F se introducen en una hoja electrónica de Excel, para el cálculo de los perfiles de capacidad de soporte lateral, cuyo procedimiento se puede apreciar en el esquema de la Fig. 6.

Primero se requiere el cálculo de la resistencia al corte no drenado, es necesario tomar en consideración el estrato en el que se encuentra el punto de interés. Si el punto se encuentra en el primer estrato (i.e. $z \leq z_c$), la resistencia Su se obtiene con la siguiente ecuación de línea recta:

$$Su = k_1 \cdot z + Su_m \qquad (2)$$

Cuando el punto se encuentra en el segundo estrato, la resistencia Su se resuelve con:

$$Su = k_2 \cdot z + k_1 \cdot z_c + Su_m - k_2 \cdot z_c \qquad (3)$$

En (2) y (3), k_1 es la gradiente de resistencia del primer estrato, z es la profundidad a la que se encuentra el punto de interés, Su_m es la resistencia al corte no drenada en la superficie del suelo, k_2 es la gradiente de resistencia del segundo estrato y z_c es el espesor del primer estrato o profundidad en que cambia el gradiente de resistencia. En la Fig. 7 se muestra un esquema que permite visualizar las variables involucradas.

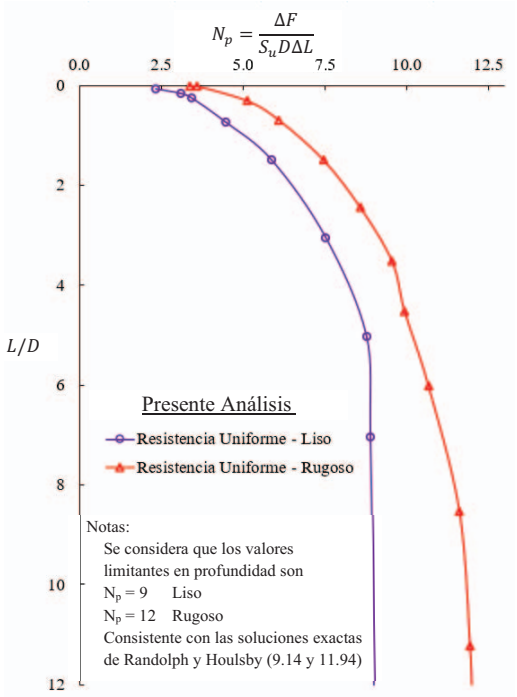


Fig. 5. Efecto de la adhesión entre suelo–pilote en la resistencia lateral. Redibujado a partir de [1].

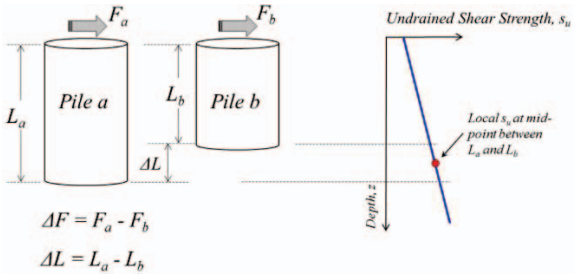


Fig. 6. Esquema de cálculo de capacidad de soporte y la correspondiente resistencia al corte no drenada [2].

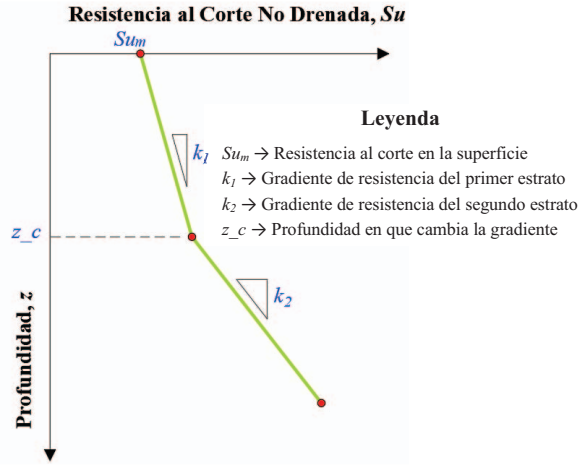


Fig. 7. Diseño general del perfil de resistencia bi-lineal.

Con el valor conocido de *Su* en la base del pilote, se calcula la fuerza debido a la resistencia en la punta, F_{base}, de la siguiente manera:

$$F_{base} = Su_{base} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (4)$$

En (4) Su_{base} es la resistencia en la punta del pilote y *D* es el diámetro del pilote. A medida que aumenta la longitud del pilote, el valor de F_{base} se torna insignificante en comparación a *F*. La fuerza resistida por el fuste del pilote, F_{shaft}, se calcula con la resta $F_{shaft} = F - F_{base}$ y se obtiene $\Delta F = F_a - F_b$ para cada segmento del pilote, donde F_a es la fuerza en el límite inferior del segmento y F_b es la fuerza en el límite superior; del mismo modo se calcula ΔL, que es la diferencia de longitud en el segmento. La variable Su_{local} es la resistencia al corte no drenada en la mitad del segmento. Finalmente se obtiene el factor de soporte lateral mediante la siguiente ecuación:

$$N_{ps} = \frac{\Delta F}{Su_{local} \cdot \Delta L \cdot D} \quad (5)$$

III. Estudio Paramétrico

A. Descripción del estudio

El estudio paramétrico consiste en la ejecución consecutiva de 3,825 casos distintos de pilotes bajo carga lateral, con el fin de garantizar la obtención de perfiles en una gran variedad de datos. Las simulaciones se ejecutan con la ayuda del algoritmo simplex, el cual permite optimizar los parámetros anteriormente mencionados.

El código original contiene la programación correspondiente a conformaciones de suelo de perfiles con corteza (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a), proveniente del estudio de [4], el cual, para efecto de este estudio, se modifica con la programación correspondiente a perfiles de suelo bilineales y los parámetros de interés.

Como referencia, se toman valores de parámetros de suelo del Golfo de Maine en las distintas pruebas; en cuanto a los pesos específicos del suelo, γ, se utiliza un valor de 14.30 kN/m³ para el primer estrato y 17.40 kN/m³ para el segundo estrato. Como valor de resistencia en la superficie, Su_m, se emplea 1.41 kPa que corresponde a la resistencia al corte del Golfo de Maine según el modo de corte simple directo [8]. Se consideran 51 valores diferentes de relación de aspecto *Lf/D* que van desde 0.00 hasta 5.00 con un incremento de 0.10 en cada intervalo, donde *Lf* corresponde a la longitud del pilote y D corresponde al diámetro. En la Tabla I TABLA I. se presenta un resumen de la variación de parámetros.

TABLA I. Parámetros para Análisis de Sensibilidad

Diámetro (m)	k_1/k_2	z_c/D
0.9144	0.25	0.5
1.5240	0.50	1
2.1336	1.00	2
2.7432	1.50	-
4.5720	2.00	-

Se trabaja con pilotes en traslación pura, en donde el centro de rotación, en teoría, se encuentra en un punto ubicado en el infinito; sin embargo, para efectos prácticos, se asigna una profundidad del centro de rotación de 60,000 m. Se considera succión en la parte trasera del pilote, por tanto, no se contempla la formación de vacío, pero sí la formación de la cuña de falla activa detrás del pilote. Además, se toma en cuenta un factor de adhesión entre suelo – pilote de 1 para pilotes rugosos. Se considera la aplicación de carga en un punto ubicado en la línea central del pilote, en la superficie.

B. Discusión de Resultados

En las Fig. 8a y Fig. 8b se muestra el perfil de capacidad de soporte lateral del suelo versus profundidad, comparada a la gráfica de resistencia al corte no drenada versus profundidad; los datos corresponden a $z_c/D = 0.5$ y una relación de gradiente de $k_1/k_2 = 0.25$. No obstante, las gráficas en las Fig. 8c y Fig. 8d son más funcionales en mostrar la relación que existe entre el diámetro del pilote y la profundidad del primer estrato, en donde la profundidad está normalizada.

Al analizar el comportamiento de los perfiles, en un primer enfoque, se observa que la identación presente en los perfiles de capacidad de soporte lateral coincide con el punto exacto del cambio de gradiente *k* (i.e. z_c) en la gráfica de resistencia al corte no drenada para cada uno de los 5 diámetros de pilotes.

En el perfil de capacidad de soporte lateral se observa que el valor máximo del factor *Nps* no llega a 12.0, lo cual es consistente con el valor estimado de 11.94 por [5] para pilotes rugosos.

Además, en las gráficas de resistencia al corte no drenada se puede apreciar la bi-linealidad del perfil e incluso se observa que la línea del primer estrato es más empinada; esto cobra sentido, ya que el gradiente k_1 es menor que k_2, dado que $k_1/k_2 = 0.25$. El primer estrato es más débil, ya que la resistencia al corte no drenada es menor en este estrato que en el segundo.

Para una mejor visualización del comportamiento de las curvas y del cambio de gradiente en las gráficas, se cambia la escala a una con mayor ampliación, por tal motivo las siguientes figuras muestran gráficas con una escala distinta en los ejes.

En las Fig. 9 y Fig. 10 se muestran los perfiles de capacidad de soporte lateral del suelo, *Nps*, y de resistencia al corte no drenada, *Su*, versus profundidad y profundidad normalizada para una relación de gradiente constante de $k_1/k_2 = 0.25$ y variaciones *de* $z_c/D = 1.0$ y $z_c/D = 2.0$, respectivamente.

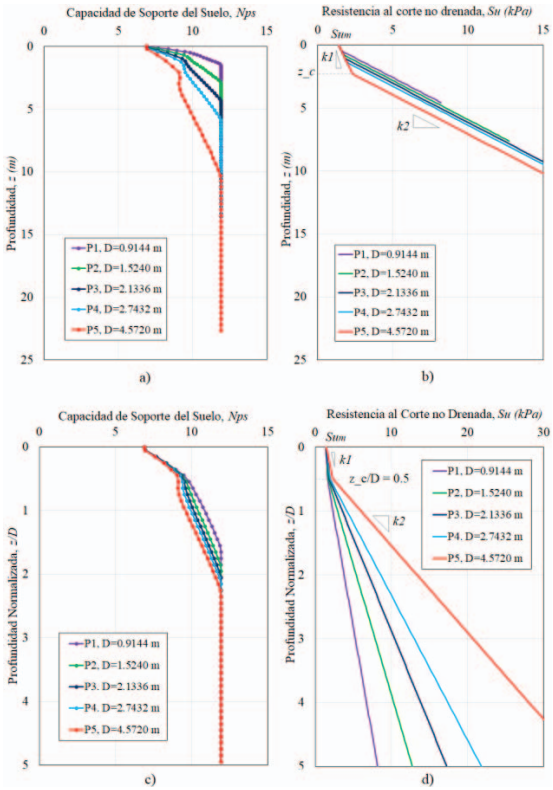


Fig. 8. Perfiles *Nps* y *Su* para $z_c/D = 0.5$ y $k_1/k_2 = 0.25$.

Luego de una observación minuciosa del comportamiento de las gráficas de las Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10, se puede notar que en la gráfica de $z_c/D = 2.0$ se desarrollan curvas regulares sin presencia de la identación en el perfil de capacidad de soporte lateral, en comparación a las gráficas de $z_c/D = 0.5$ y $z_c/D = 1.0$.

La prominencia de las identaciones es más notoria en los pilotes número 5 con diámetro de 4.5720 m, lo cual permite asumir que, a mayor diámetro, mayor tendencia a presentar la muesca en la curva.

A su vez, se evidencia que la irregularidad de las curvas en los perfiles de capacidad de soporte lateral es más evidente en perfiles con menores espesores del primer estrato, z_c.

Además, se observa que las pendientes del primer y segundo estrato mantienen su forma, pero sí cambia el espesor del primer estrato, en otras palabras, la profundidad del punto de cambio de gradiente, z_c. Esto se debe a que la relación $k_1/k_2 = 0.25$ se mantiene y se varía z_c/D.

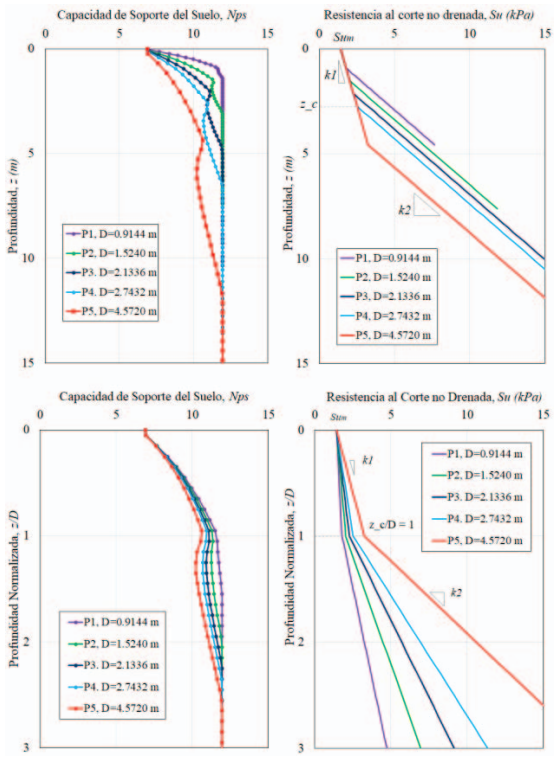


Fig. 9. Perfiles *Nps* y *Su* para $z_c/D = 1.0$ y $k_1/k_2 = 0.25$.

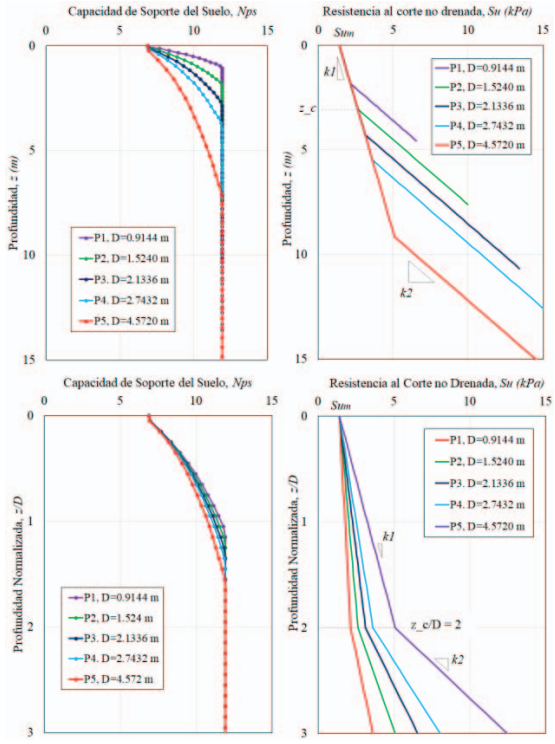


Fig. 10. Perfiles *Nps* y *Su* para $z_c/D = 2.0$ y $k_1/k_2 = 0.25$.

CONCLUSIONES

El modelo de [1] desarrollado para la estimación de capacidad lateral máxima de pilotes, existente para suelos estratificados con corteza [4], se modificó con éxito a un modelo aplicable en suelos arcillosos con perfiles de resistencia al corte con distribución bilineal; se logró implementar el modelo, con base en la teoría plástica de límite, que calcula la fuerza mínima posible del límite superior, por medio de los parámetros de optimización, para la elaboración de los perfiles de capacidad de soporte lateral para suelos con resistencia bilineal.

Mediante el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos acerca del estudio paramétrico realizado, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- En términos generales, el modelo es aplicable a pilotes con perfiles de resistencia al corte bilineales, dado que la predicción es acertada y la mayoría de los resultados del modelo parecen mostrar un comportamiento regular en el perfil. No obstante, se debe tomar en consideración la existencia de restricciones en algunos casos para los pilotes con D_5 = 4.5720 m.
- El modelo muestra mayor sensibilidad ante la variación de *z_c/D*. En suelos de espesor pequeño en el estrato superior, el método PLA ("plastic limit analysis") modela con efectividad el comportamiento de los perfiles de capacidad de soporte lateral; sin embargo, se debe tener cuidado con los pilotes de mayores diámetros (i.e. *D4* = 2.7432 m *y D5* = 4.5720 m).
- Cuando el cambio de gradiente ocurre en profundidades intermedias (i.e. *z_c/D* = 1.0), los perfiles de capacidad de soporte lateral muestran un comportamiento irregular con muescas pronunciadas en las curvas, por lo que se requiere un análisis más profundo para este caso.
- En caso de que el estrato superior se encuentre en profundidades considerables, donde su espesor sea igual o mayor que 2.0*D*, la predicción es correcta en todos los casos, ya que se ha alcanzado la región de flujo antes del cambio de gradiente.
- A medida que la relación de gradientes k_1/k_2 se aleja de 1.0, mayor cuidado se debe tener en el uso del modelo, en especial cuando el gradiente del primer estrato es menor que el del segundo.
- A pesar de que el modelo de [1] no evalúa la deformación lateral, proporciona información valiosa en cuanto a la resistencia última y es muy útil en el momento de estimar la capacidad máxima lateral de un pilote; por consiguiente, constituye una herramienta relevante como criterio de capacidad para la construcción de curvas de deformación *p-y*.

REFERENCIAS

[1] J. D. Murff and J. M. Hamilton, "P-ultimate for Undrained Analysis of Laterally Loaded Piles," Journal of Geotechnical Engineering, vol. 119, no. 1, pp. 91–107, 1993, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(91).

[2] F. J. Grajales, C. P. Aubeny, P. Jeanjean, and D. Drew, "Plastic Limit Analysis of Laterally Loaded Piles and Wells Conductors in Soil Profiles with Crust," Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, vol. 2, pp. 996–1016, 2017.

[3] F. J. Grajales, C. P. Aubeny, D. Drew, P. Jeanjean, and A. Zakeri, "Upper Bound Plastic Limit Analysis of Laterally Loaded Piles in Stratified Soils," Society for Underwater Technology, vol. 833, no. 6 2, pp. 611–619, 2017.

[4] F. J. Grajales, "Lateral Capacity of Piles and Caissons in Cohesive Soils.," Doctoral dissertation, Texas A&M University, 2017. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/1969.1/187185

[5] M. F. Randolph and G. T. Houlsby, "The Limiting Pressure on a Circular Pile Loaded Laterally in Cohesive Soil," Geotechnique, vol. 34, no. 4, pp. 613–623, 1984, doi: 10.1680/geot.1984.34.4.613.

[6] M. F. Randolph and A. R. House, "Analysis of Suction Caisson Capacity in Clay," Offshore Technology Conference, p. 11, 2002, doi: https://doi.org/10.4043/14236-MS.

[7] H. M. Matlock, "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clays," in Offshore Technology Conference, 1970, pp. 578–588. doi: 10.4043/1204-MS.

[8] A. Ashraf, "Lateral Capacity of Suction Caissons in Bilinear Soil System," Texas A&M University, 2018.

Correlation of soil properties and electrical resistivity as an indicator of erosion potential using the hole erosion test (HET)..

Edgar Ortega
School of Civil Engineering
Universidad Tecnologica de Panama
Panama City, Republic of Panama
edgar.ortega1@utp.ac.pa

Michelle Lee Barry
Department of Civil Engineering
University of Arkansas
Fayetteville, Arkansas, USA
mlbernha@uark.edu

Francisco Grajales-Saavedra
School of Civil Engineering
Universidad Tecnologica de Panama
Panama City, Republic of Panama
francisco.grajales@utp.ac.pa

***Abstract*— Erodibility is defined as the resistance of soils and rocks to erosion. In recent years, several studies have been conducted on the correlation between erodibility and geotechnical properties of soil. However, erodibility and its relationship with geophysical properties, such as electrical resistivity, are still under investigation. Geophysical methods provide a non-destructive way to evaluate soils over large areas, so using them to evaluate erosion would save time and money. The following research aimed to test soil samples and develop possible correlations between soil erodibility and electrical resistivity. However, there are many geotechnical properties that influence soil erodibility and resistivity, therefore, in establishing these correlations the influences of plasticity index, dry density and moisture content were studied. A modified standard Hole Erosion Test system was built to determine the erosion rate index, which is a way of quantifying erodibility, while a Nilsson Model 400 resistance meter was used to determine electrical resistivity. The results showed that there is an existing correlation between resistivity and erodibility for the soils studied categorized as "very strong", according to Pearson's linear correlation coefficient. This research gives rise to the possibility of elaborating a mathematical model that allows estimating the erosion rate index from the electrical resistivity of the soil.**

Keywords—Erosion, erodibility, electrical resistivity, Hole Erosion Test, correlation.

I. Introduction

Current methods for estimating erosion simplify the issue by considering only the hydraulic side of the problem and ignore soil properties or require expensive sampling and laboratory testing when only discrete information is available. Many studies have been conducted to find a relationship between erosion and geotechnical properties of the soil, such as plasticity index [1]; moisture content, density, organic content, porosity and water chemistry [2]; eroded particle size, cohesion and the effect of the weight of water [3].

In 2001, Briaud et al. [4] published an important research paper in which they introduced the Erosion Function Apparatus (EFA) which was used to measure the erosion rate of fine-grained soils and to establish the relationship between erosion rate and hydraulic shear stress. The data collected with the EFA allowed an attempt to establish a correlation between erodibility and soil properties. However, it was concluded that there were too many parameters involved due to the number of mechanical and chemical properties of both soil and water, so the tests needed to determine a relationship would also be numerous.

In the research of Bernhardt et al. [5] erosion functions for 20 Mississippi River levee samples were determined using EFA. The samples used in the tests were chosen to represent a wide range of material types, levee sites, and erosion performance. These were collected from eight levee sites that experienced flooding in 2008. The erosion resistance of the soils tested was attempted to correlate with the plasticity index of the soils tested as shown in the Figure 1.

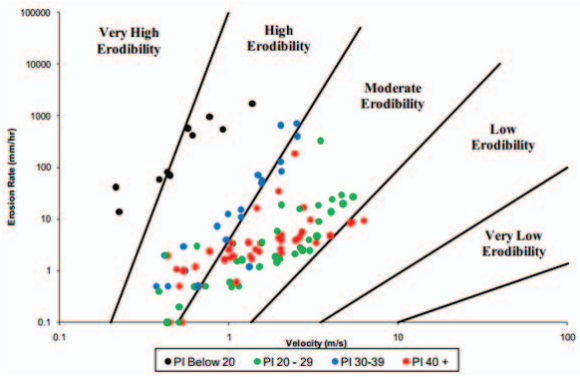


Fig. 1. Erosion rate versus velocity for Mississippi River levee samples.
Source: [5]

There appears to be a slight trend, with higher PIs for more erosion resistant soils and the lack of a clear trend suggests that erosion is influenced by more than just plasticity. These soils were all natural samples that varied in many properties, making it difficult to systematically study the influence from any one property.

Seismic and electrical geophysical techniques can be used to assess large sections of levees in a timely manner to locate weak and saturated zones which often indicate locations where internal erosion damage may be present. Recently, Karim et al. [6] has shown a study with the objective of determine if field and laboratory measurements of electrical resistivity (ER) can be used for characterizing soil erodibility and assessing the impact of saturation, as expected during a flood event, on ER models of soil erodibility. An electrical resistivity tomography

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00034

(ERT) survey and conventional soil sampling were conducted at 21 bridge sites across eastern Kansas. An erosion function apparatus (EFA) was used to test 72 samples from the 21 sites for erosion testing and soil analysis; and the erosion test results were compiled using the HEC-18 erodibility categorizing graph (Figure 2), which calculates erosion rate versus shear stress. For ER measurements in the laboratory, ten samples were tested using a Nilsson Model 400 resistance meter connected to a large M.C. Miller soil box.

The in situ and the laboratory ER showed a difference from 0 to 2.10 Ωm for the ten samples (with the same in situ degree of saturation), indicating consistency on the results.

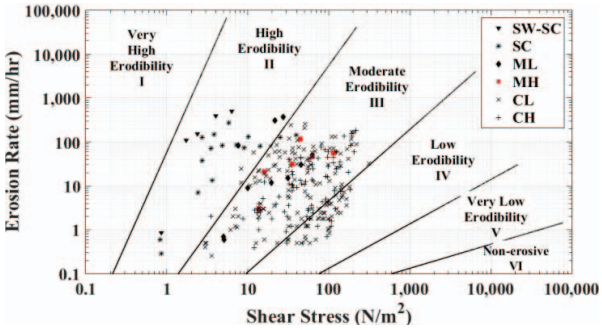


Fig. 2. Erosion rate versus shear stress for the 72 soil samples from the 21 sites across eastern Kansas
Source:[6]

Previously, Karim & Tucker-Kulesza [7], attempted to predict the erodibility of soils using ERT at 14 bridge sites across eastern Kansas. However, once the ER values from the soil samples were expressed through the HEC-18 erodibility categorizing graph overlaps could be observed between "high" and "not high" (referring to "moderate" and "low") erodibilities, meaning that there were highly erodible samples that corresponded to very low ER, and there were samples that were not highly erodible and had a very high ER.

Karim et al. [6] added 7 new bridge sites and considered that characterization for high erodibility soils from the rest of the soils is a binary problem, using then a statistical tool known as a Receiver Operating Characteristics (ROC) curve illustrates the diagnostic ability of a binary classifier.

To identify high erodibility soils from soils with less erosion potential, a cut-off value of 50 Ωm was used for this model. The results demonstrated that with ER alone, there is an 87% chance of properly identifying high erodibility soils. There were some limitations for this study such as high degree of saturation in situ for every soil and high concentration of dissolved salts.

Although geophysical methods have demonstrated their potential to provide rapid measurements of material properties over large areas, there is currently no widely accepted correlation between geophysical properties and erodibility due to the lack of research on the subject. This study aims to gain a better understanding of this relationship by considering the influence of different soil properties, such as plasticity index, water content and density, while using the hole erosion test (HET) as the erodibility measurement procedure and the four-electrode Wenner method as the electrical resistivity measurement procedure.

II. Experimental Methodology

A. Soil samples

Six different benchmark soils were prepared by mixing commercially available red art clay, sand, kaoline clay and bentonite clay. Their composition is presented in **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Liquid limit, plastic limit and plasticity index were determined according to ASTM D4318 [8], and optimum water content and maximum dry density according to ASTM D698 [9]; results are shown in **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. To fulfill the specific objectives of this research, soils classified as clayey sand, SC, and one soil classified as silty sand, SM, were used. The benchmark soils were classified using the unified soil classification system (USCS) [10].

TABLE 1. Material description and USCS classification for the benchmark soils used in this study

Designation	Soil Composition (%)				Soil Classification
	Play Sand	Red Art Clay	Bentonite	Kaoline Clay	USCS
SC-1	70	30	-	-	SC
SC-2	70	25	5	-	SC
SC-3	70	15	15	-	SC
SC-4	70	10	20	-	SC
SC-5/CL-1	50	50	-	-	SC/CL
SM-1	70	-	-	30	SM

TABLE 2. Index properties, optimum water content and maximum dry density for benchmark soils

Designation	Atterberg Limits			Standard Proctor Compaction	
	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Optimum W.C (%)	Max Dry Density (kg/m^3)
SC-1	23	12	11	9.5	2120
SC-2	24	10	14	9.6	2128
SC-3	61	18	43	11.5	1902
SC-4	57	13	44	12.8	1875
SC-5/CL-1	26	13	13	10.4	2060
SM-1	26	15	11	10.2	1972

B. Geotechnical properties of the investigated soils

There are many geotechnical properties that influence soil erodibility and resistivity. To demonstrate a

correlation, it is necessary to know how each geotechnical property influences these two variables. In this study it was proposed to study the influence of the plasticity index, dry density, and moisture content, for which three groups of tests were proposed.

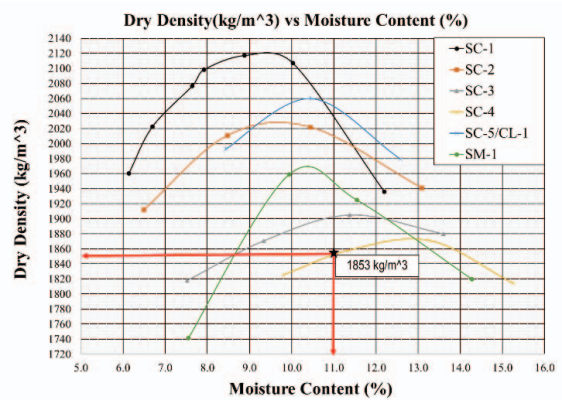


Fig. 3. Dry density and moisture content used to study the influence of the plasticity index.

To investigate the influence of the plasticity index, tests were carried out with all the soil mixtures presented in Table 1. In this case, the dry density and moisture content were to be kept constant; but the curve of dry density versus moisture content varies for each soil, the solution found was to place all the curves in a single graphical representation and determine which of them had the lowest density value that could be achieved for all the samples to be tested. It should be noted that this required using a reduced compaction effort (lower number of blows) and that the number of blows used depended on the soil tested. Taking a higher value could mean having to use more blows than the 25 used in the Proctor mold for the HET or damage to the soil sample box of the resistivity test, due to the applied stress.

The density and moisture content used were 1853.00 kg/m^{3}and 11.00 %, respectively, for each of the samples. These values corresponded to the SC-4 soil curve, as shown in Figure 3. Therefore, for the HET and resistivity test, the amount of total soil mass required to achieve that density was calculated and the soil samples were compacted accordingly.

Studying the influence of dry density required keeping the plasticity index and moisture content constant for the tests. This was achieved by performing all tests with the soil designated SC-3, at its optimum moisture content of 11.50 %. The changes in dry density were achieved by varying the number of blows used to compact the soil in the Proctor mold of each HET. Subsequently, for the resistivity test only the total mass needed to be compacted in the soil box to achieve the densities previously obtained in the HET was calculated.

The values of erosion rate index and resistivity were compared for three different densities, which were obtained by using 25, 22 and 19 blows with the 24.47 N rammer, used in ASTM D698 [9]. The information from above can be better represented through Figure 4.

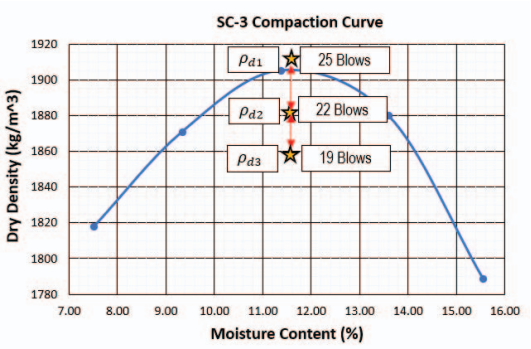


Fig. 4. Number of blows used to achieve different dry densities.

In the tests of the moisture content influence study, to keep the plasticity index constant, only the soil designated as SC-3 was used again but figuring out how to maintain the dry density required a little more elaboration. The solution that was found was to take the density value obtained with the 19 blows on the SC-3 soil in the density tests and represent it through a point on its respective compaction curve.

Subsequently, a horizontal line was drawn from the point to both sides of the compaction curve until it touched it and it was determined which additional water contents could share the same density, as shown in Figure 5. The water contents obtained were 9.30, 11.50 and 13.90 % for a single density of 1873.00 kg/m^3 (19 blows). Prior to HET and resistivity testing, the total mass required to achieve this dry density was calculated.

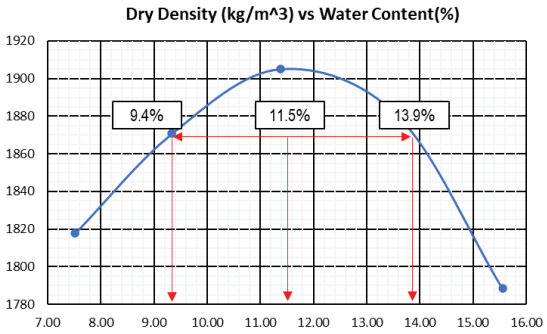


Fig. 5. Water contents at same density for SC-3

C. *Methodology for the Hole Erosion Test*

To measure the soil erosion rate index (ERI), a Hole Erosion Test (HET) system was built. The design is similar to the one proposed in [11], with the main difference being that instead of using a tank as a water supply that is raised to increase the hydrostatic pressure, the system developed for this study uses a hose that directly connects the water supply with the HET system. The flowrate and differential pressure head are controlled manually by a valve. Fig. ***6*** shows the standard assembly for the HET and Fig. *7* the setup used for this research.

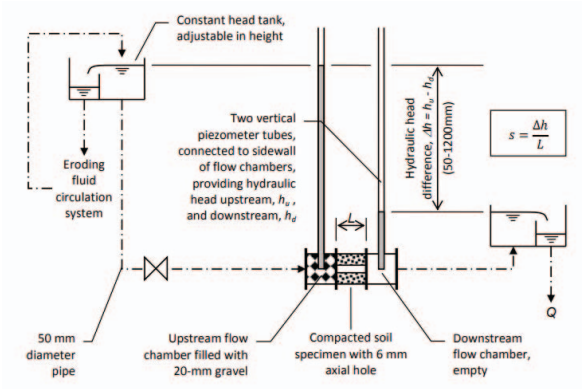


Fig. 6. Schematic diagram for the hole erosion test
Source: Obtained from [12]

The upstream and downstream chambers had a length of 60.96 cm, an inner diameter of 10.16 cm and an outer diameter of 10.80 cm to properly fit the standard Proctor mold of the sample. To ensure zero slope in the HET chambers, an adjustable platform was used under one side of the system and controlled with a spirit level while setting the initial height.

To measure and record the differential pressure between the upstream and downstream chambers during the test, an NPX MPX5700 sensor together with a 1608FS USB acquisition card attached to piezometers was used, while a water diaphragm connected to an NPX MPX5010 sensor together with a 1408FS USB acquisition card was used to measure and record the flow rate. The interpretation of the data in real time during the execution of the test was generated by a program developed in Agilent Vee, which is a language used in data acquisition and control. In this way, the variations in differential pressure and flow rate could be monitored.

Once the differential pressure began to decrease during the test, it was assumed that the erosion process had begun. The acquisition cards stored data at 10-second intervals, while the program interface could be observed at 1-second intervals.

The effects of time and gradual saturation of the surface of the hole may result in progressive erosion, particularly if the soil is dispersive such as clays classified as CL, like the red art clay that was used for this research. To verify that the initial diameter remained the same until erosion began and the increase of the hole diameter throughout the test, a waterproof camera Teslong Dual Sens, with an image quality of 1080p was used at 10.00 cm from the hole in the downstream chamber, which is presented with a support in Figure 8a. For digital image processing to determine the diameters, a plastic disk with 1.27 cm lines was placed on the downstream face of the compacted sample, as shown in Figure 8b. These lines were used as a reference to calibrate the image processing software, ImageJ, in its 64-bit version for Java 1.8.0_172.

To ensure the target water content, the water and dry soil were mixed uniformly and weighed on a balance accurate to 0.01 g. The mixed soil was sealed in a container for a period of 24 hours under controlled temperature and humidity. To start with the HET, the soil specimen was compacted inside a standard 10.16 cm diameter mold used for the standard compaction test, using 25 blows of a 24.47 N rammer, according to ASTM D698 [9].

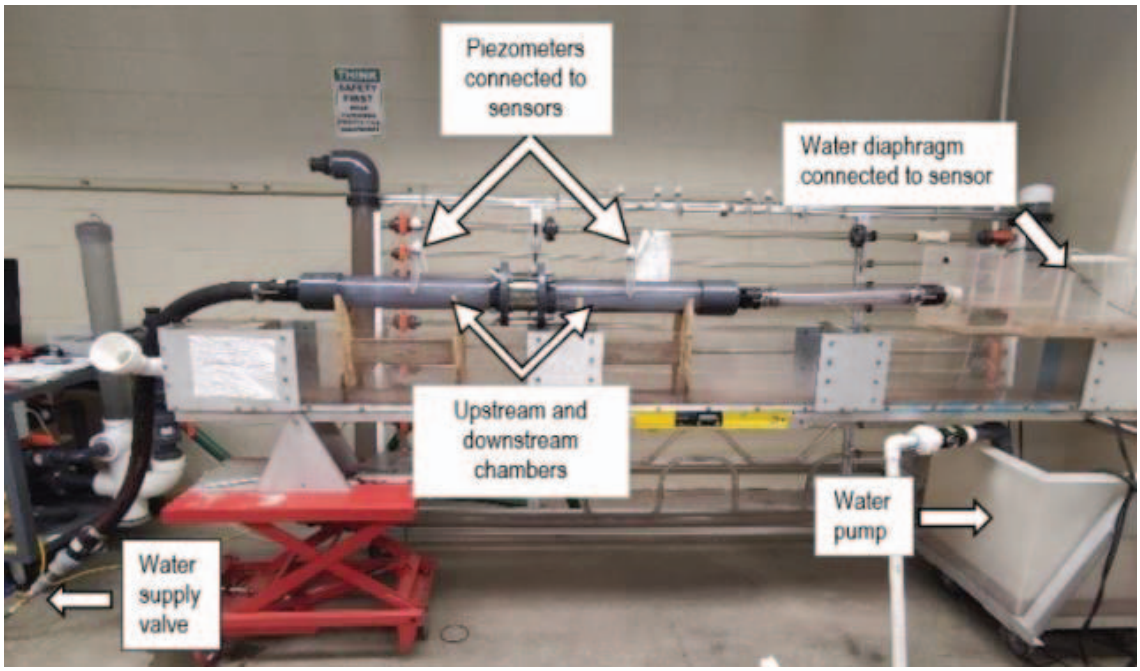


Fig. 7. Hole erosion test system built for this research.

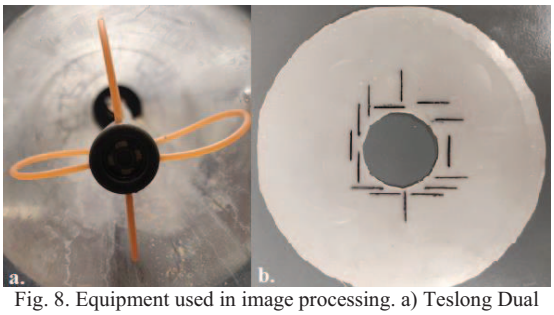


Fig. 8. Equipment used in image processing. a) Teslong Dual Sens camera. b) Plastic disk with reference lines.

Water content and density were recorded to corroborate compliance with the previously established values. Once the soil was compacted, a 6.00 mm diameter hole was drilled along the center of the soil sample to simulate tunnel erosion using a drill.

Subsequently, the initial hole diameter was measured using a Vernier caliper. This value ranged from 5.95 mm to 6.00 mm for all tests. The compacted soil was then placed in the system and water was flowed through it. The initial flow rates corresponded to no more than 0.10 L/min and the differential pressure to 30.00 mm in terms of water column. If the initial differential pressure was not sufficient to produce erosion, which causes a constant pressure drop, it was increased at intervals of at least 140.00 mm H_2O. After the pressure drop, the valve opens gradually, trying to keep the differential pressure that caused the erosion process constant.

For the soils tested in this investigation, the differential pressure values that initiated erosion ranged from 70 to 2800.00 mm H_2O, with test times ranging from 20 minutes to 1 hour or until the highest possible flow rate was reached. This can be set as an intermediate time between the periods discussed in the literature; according to Wan & Fell [11], it was to last 2 hours and, according to Wahl et al.[13], about 45 minutes. After each increase in differential pressure, a photograph was taken using the Teslong camera to observe whether there was an increase in diameter. In each test performed, the water temperature was taken, which ranged from 17.50 to 23.00 ºC.

Once the test was completed, the mold with the sample was removed and the final diameter was measured using a Vernier caliper, in addition to determining the final length of the soil sample. The ImageJ program was then used to corroborate that the initial and final diameters were like those measured with the Vernier caliper; if not, then the new diameters determined with the software were used.

For the determination of the ERI and the applied shear stress values, a Microsoft Excel template was developed to automate and facilitate the calculations. In the HET, the hydraulic shear stress along the pre-formed hole can be expressed as:

$$\tau_t = \rho_w g s_t \frac{\phi_t}{4} \quad (1)$$

Where, τ_t is the hydraulic shear stress on the surface of the pre-formed hole at time, t, (N/m^2); ρ_w is density of the eroding fluid (kg/m^2); g is acceleration due to gravity (9.81 m/s^2); s_t is hydraulic gradient across the soil sample at time, t; and ϕ_t is the diameter of the pre-formed hole, assumed to remain circular at time, t.

The rate of erosion per unit surface area, $\dot{\varepsilon}_t$, (kg/s/m^2) of the pre-formed soil at time, t, is given by:

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\rho_d}{2}\frac{d\phi_t}{dt} \quad (2)$$

Where, ρ_d is the dry density of the soil (kg/m3).

The diameter, ϕ_t, can be estimated using the following equations:

$$\phi_t = \left(\frac{16 Q_t f_{Lt}}{\pi \rho_w g s_t}\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\phi_t = \left(\frac{64 Q_t^2 f_{Tt}}{\pi^2 \rho_w g s_t}\right)^{1/5} \quad (4)$$

Where, equation **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** is used for laminar flow conditions and equation **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** is used for turbulent flow conditions; f_{Lt} and f_{Tt} are both friction factors for the laminar flow and turbulent flow, respectively. According to Wan and Fell procedure [14], friction factors are assumed to vary linearly through time.

Then diameter, ϕ_t, through time is plotted and a second degree a polynomial function of second degree is used as a trend line to obtain the values for the slope, $\frac{d\phi_t}{dt}$. With this information was computed the hydraulic shear stress along the hole, $\boldsymbol{\tau_t}$, and the rate of erosion, $\dot{\varepsilon}_t$, using the equations (1) and (2), respectively.

Once the rate of erosion, $\dot{\varepsilon}_t$, is plotted against the estimated shear stress, $\boldsymbol{\tau_t}$, the rising portion of the plot can be approximated by a best-fit straight line and the slope of that best-fit straight line gives the value of C_e, which is the coefficient of soil erosion (s/m) used to determine the Erosion Rate Index, I, defined as:

$$I = -\log(C_e) \quad (5)$$

The index, I, has an order of magnitude in the range of 0 to 6, where a small value implies a more rapidly erodible soil. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** shows the classification proposed by Wan and Fell in [11].

Unlike the investigations carried out by Wan and Fell [11], [14]; and by Wahl et al.[13] where the flow rate was automatically increased as the hole diameter got bigger, during this investigation the flow rate increase was performed manually by opening the water source valve seeking to maintain the same differential pressure that

caused the onset of erosion for as long as possible. It is then to be expected that the shape of the curve generated is different in a certain margin to that found in previous investigations, it was observable in samples of easily eroded soils such as SC-1, SC-5 and SM-1 that trying to maintain the pressure difference with a valve with a sensitivity like the one used in this research was complicated and constantly drops in the water flow rate was evident, which led to erroneous results related to the function of increasing hole diameter over time presenting only negative slope during the time of progressive erosion.

TABLE 3. Classification of soils in group numbers according to their erosion rate index

Group Number	Erosion rate index	Description
1	<2	Extremely rapid
2	2-3	Rapid
3	3-4	Moderately rapid
4	4-5	Moderately slow
5	5-6	Very slow
6	>6	Extremely slow

Source: Obtained from [11]

Since previous research on [11], [12], [13] and [14] presents little information on the rate of flow growth over time during erosion and only uses the term "flow acceleration" to refer to the way it increases, it was proposed to use trend lines to obtain more consistent results. In this case, the trend line that worked best was an exponential function as shown in Fig. ***9***.

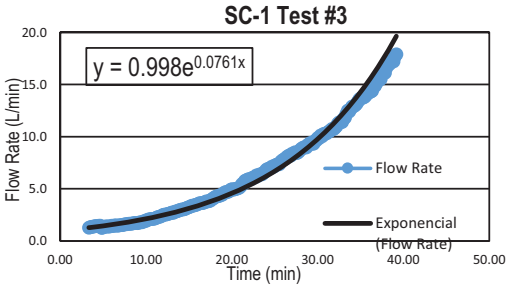


Fig. 9. Fitted curve using an exponential function for the obtained flow rate data

D. *Four-electrode Wenner method for determination of electrical resistivity*

A similar system used in the research of Kouchaki et al. [15] consisting of a Nilsson Resistance Meter Model 400 in a 4-electrode array with an M.C. Miller Large Soil Box (M.C. Miller Co., Sebastian, FL) was used to measure the ER of the soil specimens, which can be shown in Fig. ***10***.

Electrical resistivity is usually measured with four electrodes: two electrodes to inject the current ("current electrodes"), and two electrodes to record the resulting potential difference ("potential electrodes") [16]. The ER of the soil in this configuration following ASTM G57-20 [17], can be expressed as:

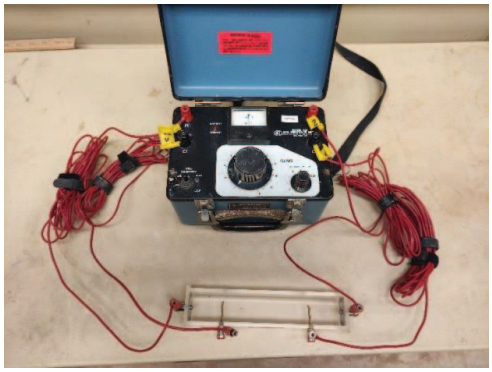


Fig. 10. A Nilsson Resistance Meter Model 400 in a 4-electrode array with an M.C. Miller Large Soil Box.

$$\rho = \frac{RA}{a} \tag{6}$$

Where, R is the electrical resistance between the two inner electrodes in Ohms (Ω), A is the cross section of the soil specimen in cm^2, and a is the distance between the inner electrodes in cm.

Initially the soil and water were weighed on a scale with an accuracy of 0.01 g. These are mixed uniformly and placed in a container for a period of 24 hours at a controlled temperature and humidity. Prior to the test, the soil was weighed again to ensure that the water content was met, then the soil was placed in the box and compacted to the required density. The temperature also influences the measurement of resistivity, so it was taken in three different parts to obtain an average. The average temperature for the tests ranged from 21.3 to 21.6ºC.

E. *Determination of correlation strength*

Several statistical tools can be used to determine the degree of correlation between two variables. However, after plotting the results, it was observed that a linear function gave a better fit and the use of Pearson's linear correlation coefficient was proposed as a measure of the strength of the relationship between variables. The coefficient is denoted by the letter, r, and its range of values is presented as:

$$-1 \leq r \leq +1 \tag{7}$$

In 1996 Richard Evans suggested ranges to describe the strength of correlation[18], which are represented in TABLE 4.

TABLE 4. Pearson's Linear Correlation Ranges

Range	Correlation
.00-0.19	Very weak
0.20-0.39	Weak
0.40-0.59	Moderate
0.60-0.79	Strong
0.80-1.0	Very Strong

Source: Obtained from [18]

III. Results and Discussion

A. Influence of Plasticity Index

TABLE 5. Results of HET for P.I.

Hole Erosion Test									
Desig.	Test 1			Test 2			Test 3		
	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ERI	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ERI	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ERI
SC-1	11.4	1839	3.93	10.9	1847	4.34*	11.4	1840	4.0
SC-2	11.2	1847	4.31	11.1	1833	4.60	NA	NA	NA
SC-3	11.0	1837	4.66	10.9	1840	4.72	NA	NA	NA
SC-4	11.4	1844	5.24	11.4	1845	4.60*	NA	NA	NA
SC-5/CL	11.1	1835	3.83*	11.1	1848	4.25	11.0	1848	4.1
SM-1	11.0	1842	4.17	11.1	1835	3.99	NA	NA	NA

Note: Values with (*) correspond to those where one or more problems were encountered during data processing.

TABLE 6. Results of Resistivity for P.I.

Electrical Resistivity Test						
Designation	Test 1			Test 2		
	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ER (Ω·m)	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ER (Ω·m)
SC-1	11.2	1838	55	11.2	1842	55
SC-2	11.4	1838	12.5	10.9	1839	14.5
SC-3	11.1	1846	8.5	10.8	1849	11
SC-4	10.9	1868	8.45	11.5	1873	8
SC-5/CL	10.6	1826	51.5	NA	NA	NA
SM-1	11.1	1847	63	NA	NA	NA

B. Influence of Dry Density

TABLE 7. Results of HET for Dry Density

Hole Erosion Test							
Desig.	Number of Blows	Test 1			Test 2		
		w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ERI	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ERI
SC-3	25	11.33	1912	5.20	11.67	1918	5.56
SC-3	22	11.61	1897	5.06	NA	NA	NA
SC-3	19	11.39	1873	4.84	11.69	1867	4.88*

Note: Values with (*) correspond to those where one or more problems were encountered during data processing.

TABLE 8. Results of Resistivity for Dry Density

Electrical Resistivity Test			
Designation	Test 1		
	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ER (Ω·m)
SC-3	11.31	1904	7.70
SC-3	11.26	1894	8.05
SC-3	11.57	1863	8.11

C. Influence of Water Content

TABLE 9. Results of HET for Water Content

Hole Erosion Test							
Designation	Target dry density (kg/m^3)	Test 1			Test 2		
		w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ITE	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ITE
SC-3	1873.0	9.88	1878	4.89	NA	NA	NA
SC-3	1873.0	11.39	1873	4.84	11.69	1867	4.88*
SC-3	1873.0	13.86	1877	4.54*	14.20	1858	4.73

Note: Values with (*) correspond to those where one or more problems were encountered during data processing.

TABLE 10. Results of Resistivity for Water Content

Electrical Resistivity Test			
Designation	Test 1		
	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	ER (Ω·m)
SC-3	9.88	1859	14.5
SC-3	11.57	1863	8.11
SC-3	14.12	1852	6.5

D. Linear correlation between ERI and ER

The soil erosion rate index values were plotted with the electrical resistivity values to see the tendency of both as each of the properties investigated varied. These representations correspond to Fig. ***11***, Fig. ***12*** and Fig. ***13***.

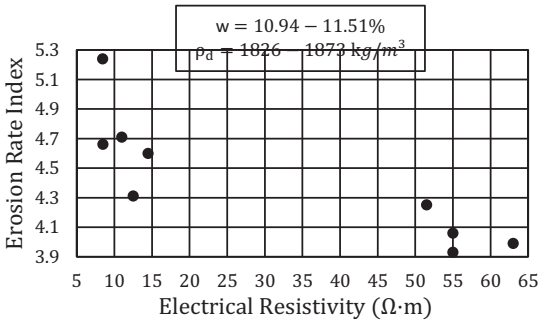


Fig. 11. ERI vs ER influenced by variations in plasticity index.

Fig. ***11*** shows ERI vs ER points when there are only variations in P.I. values, but it was not possible to generate a linear correlation between both parameters since the data are limited and clustered in extremes.

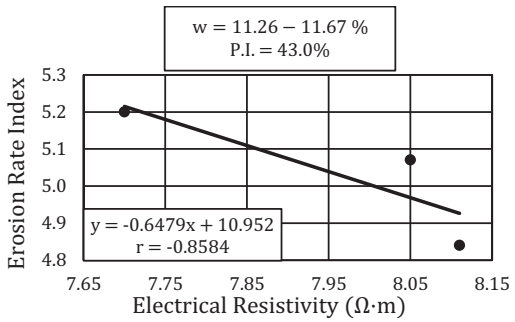


Fig. 12. ERI vs ER influenced by variations in dry density

On the other hand, the erosion rate index increases as the resistivity decreases under the influence of dry density,

as shown in Fig. ***12***. The degree of correlation was described as "very strong" and negative (r = -0.85).

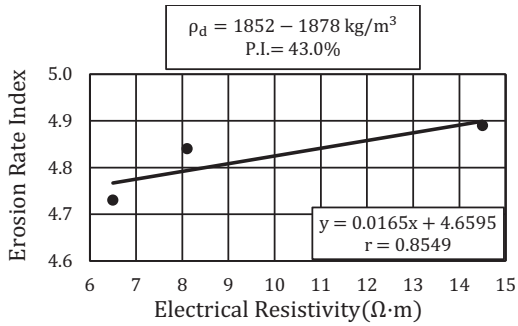


Fig. 13. ERI vs ER influenced by variations in water content.

The correlation has a different meaning when there are only variations in the moisture content, being "very strong" and positive (r = 0.85), as shown in Fig. ***13***.

It should be considered that the attempts to keep the geotechnical properties constant in each test were not perfectly achieved. As evidence, differences can be observed between the tests of up to 0.55 % in moisture content, as shown in Fig. ***12*** ; and 47.00 kg/m^3 in dry density, as shown in Fig. ***11***.

IV. Conclusions

An investigation was carried out to obtain a better understanding of the correlation between the geotechnical properties of the soil and the electrical resistivity, considering the possible use of the latter as an indicator of erosion potential. The geotechnical properties studied were plasticity index, dry density, and moisture content.

A correlation between the erosion rate index and electrical resistivity considering the influence of the plasticity index could not be established due to the limitation of tests and their distribution in the graphical representations. However, for the correlations obtained with dry density and moisture content, the degree of linear correlation was described as "very strong" ($r \geq 0.8$), but it should be considered that there are only a few points.

The information collected can lead to the elaboration of a mathematical model that describes the behavior of the erosion rate index through the electrical resistivity of the soil, contemplating variations of the 3 geotechnical properties studied. However, it is necessary to carry out a greater number of tests that seek to replicate or improve the results presented, given that among the limitations of this research is the use of only 2 types of soils (SC and SM); not being able to keep the geotechnical properties perfectly controlled; and the HET system is a modified one, of which there are no other studies as a reference.

Acknowledgment

The authors would like to thank the National Secretariat for Science Technology and Innovation (SENACYT) of the Republic of Panama, for providing the funding to develop this collaborative research. Also, the authors would like to thank Dr. Ruimin Feng for his valuable assistance during the research. The experimental work was carried out in the laboratories of the civil engineering faculty at the University of Arkansas with the assistance of Viktor Hoestbo and Mark Kuss, who are thanked for their valuable help.

References

[1] G. J. Bouyoucos, "The clay ratio as a criterior of susceptibility of soils to erosion," *J. Am. Soc. Agron.*, no. 27, p. 738/741, 1935.

[2] E. Grissinger, "Bank erosion of cohesive materials," *Gravel-bed Rivers*, pp. 273–287, 1982.

[3] T. E. Mirtskhulava, "Erosional stability of cohesive soils," *J. Hydraul. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 37–50, 1966, doi: 10.1080/00221686609500091.

[4] J. Briaud *et al.*, "Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions," vol. 5, no. February, pp. 105–113, 2001.

[5] M. Bernhardt *et al.*, "Mississippi River Levee Failures : June 2008 Flood," *Int. J. Geoengin. Case Hist.*, vol. 2, no. 3, pp. 127–162, 2011, doi: 10.4417/IJGCH-02-02-03.

[6] M. Z. Karim, S. E. Tucker-Kulesza, and M. Bernhardt-Barry, "Electrical resistivity as a binary classifier for bridge scour evaluation," *Transp. Geotech.*, vol. 19, no. February, pp. 146–157, 2019, doi: 10.1016/j.trgeo.2019.03.002.

[7] M. Z. Karim and S. E. Tucker-Kulesza, "Predicting Soil Erodibility Using Electrical Resistivity Tomography," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 144, no. 4, p. 04018012, 2018, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001857.

[8] ASTM D4318, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA, USA, 2017.

[9] ASTM D698, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))*. West Conshohocken, PA, USA, 2021.

[10] ASTM D2487, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA, USA, 2017.

[11] C. F. Wan and R. Fell, "Investigation of Internal Erosion and Piping of Soils in Embankment Dam." 2002.

[12] M. Luthi, "A MODIFIED HOLE EROSION TEST (HET-P) TO STUDY EROSION CHARACTERISTICS OF SOIL," University of Applied Sciences Rapperswil, 2011.

[13] T. Wahl, P.-L. Regazzoni, and Z. Erdogan, "Determining Erosion Indices of Cohesive Soils with the Hole Erosion Test and Jet Erosion Test Dam Safety Technology Development Program," no. October, 2008, [Online]. Available: http://www.ntis.gov.

[14] C. F. Wan and R. Fell, "Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams," vol. 130, no. April, pp. 373–380, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130.

[15] B. M. Kouchaki, M. L. Bernhardt-Barry, C. M. Wood, and T. Moody, "A Laboratory investigation of factors influencing the electrical resistivity of different soil types," *Geotech. Test. J.*, vol. 42, no. 4, pp. 829–853, 2019, doi: 10.1520/GTJ20170364.

[16] A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, and G. Richard, "Electrical resistivity survey in soil science: A review," *Soil Tillage Res.*, vol. 83, no. 2, pp. 173–193, 2005, doi: 10.1016/j.still.2004.10.004.

[17] ASTM G57, *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. 2015.

[18] R. H. Evans, "An Analysis of Criterion Variable Reliability in Conjoint Analysis," *Percept. Mot. Skills*, vol. 82, no. 3, pp. 988–990, 1996, doi: 10.2466/pms.1996.82.3.988.

Lateral Human-Structure Interaction in a flexible structure through Hybrid Simulation

Interacción Humano-Estructura lateral en una estructura flexible mediante Simulación Híbrida

J. F. Gil[1], B. Castillo[2], P. Thomson[3]

[1] Universidad del Valle, Estudiante de pregrado, CALI, juan.fernando.gil@correounivalle.edu.co
[2] Universidad del Valle, Estudiante de doctorado, CALI, bryan.castillo@correounivalle.edu.co
[3] Universidad del Valle, Profesor titular, CALI, peter.thomson@correounivalle.edu.co

***Abstract*— Structures such as pedestrian bridges can present dynamic sensitivity problems when subjected to anthropic loads, the mutual influence of these two actors is known as human-structure interaction (HSI). The study of this phenomenon has been carried out through numerical models, which still fail to represent it completely, and through full-scale experimental tests that, despite being faithful, are not feasible for most educational institutions due to their high price, space requirements and large number of personnel and equipment. In this sense, it is proposed in this research to evaluate the lateral HSI in pedestrian bridges using the hybrid simulation. By substructuring the problem into a structural system, which will be the numerical substructure, and a human system, represented by three test subjects, which will be the experimental substructure, lateral HSI tests were performed using HS, with the help of an instrumented treadmill and a shaking table as a transfer system. The response of the pedestrian bridge obtained from the tests indicates that the proposed pedestrian bridge does not present serviceability problems due to the passage of a pedestrian, although it may be close to the maximum accelerations allowed by ISO 10137. It was concluded that the transfer system did a good tracking of the reference signal. In addition, the configuration and the transfer system allowed the realization of a real-time hybrid simulation.**

Keywords—Human-Structure Interaction, Hybrid Simulation, evaluation

***Resumen* — Estructuras como los puentes peatonales pueden presentar problemas de sensibilidad dinámica cuando se ven sometidos a cargas antrópicas, la influencia mutua de estos dos actores se conoce como Interacción Humano-Estructura (IHE). El estudio de este fenómeno se ha realizado a través de modelos numéricos, que aún no logran representarlo completamente, y mediante pruebas experimentales a escala completa que, a pesar de ser fieles, son poco factibles para la mayoría de las instituciones educativas debido a su alto costo, requerimiento de espacio, personal calificado y equipo. En este sentido se propone en esta investigación evaluar la IHE lateral en una estructura flexible mediante la implementación de la SH. La SH permite subestructurar el problema en un componente numérico, que consiste en una estructura flexible, y un componente experimental, conformado por sujetos de prueba. Lo anterior permitió realizar pruebas de IHE lateral teniendo como sistemas de transferencia el simulador sísmico, y como sistema de adquisición el marco de pruebas de IHE, ambos de la Universidad del Valle. Las respuestas de la estructura muestran que, aunque no se presentan problemas de serviciabilidad por vibración al paso de un peatón, puede estar cercana a las aceleraciones máximas permitidas por la ISO 10137. Se concluyó que el sistema de transferencia y de adquisición tienen la capacidad de integrar la dinámica intrínseca de la IHE sobre una estructura flexible, aún para su realización en Tiempo-Real.**

Palabras claves —Interacción Humano-Estructura, Simulación Híbrida, evaluación, estructura flexible, subestructuración dinámica

I. INTRODUCCIÓN

La tendencia en el desarrollo de estructuras civiles más esbeltas, con menor masa, rigidez y amortiguamiento, como graderías, losas y puentes peatonales, ha llevado a estas a presentar problemas de vibraciones excesivas, haciéndolas susceptibles a cargas dinámicas como las sísmicas, eólicas y antrópicas [1], [2]. Durante los últimos años, un alto número de puentes peatonales han presentado problemas de sensibilidad dinámica [3], debido a su esbeltez, que se presenta a su vez por el mejoramiento de las características mecánicas de los materiales, lo que permite la reducción de la sección de los elementos. Ya que la función principal de los puentes peatonales es el tránsito de personas, las cargas antrópicas resultan la fuente de vibraciones más importante a estudiar [1]. La identificación de las cargas es fundamental porque, a pesar de que este problema en muchos casos no afecta la salud de la estructura, se pueden presentar problemas de serviciabilidad, teniendo en cuenta que el cuerpo humano es sensible a las vibraciones desde 0.001 mm [4].

Debido a la incidencia de las cargas antrópicas sobre la dinámica de los puentes peatonales se puede presentar un fenómeno conocido como interacción humano estructura (IHE), el cual se puede definir como la alteración en el comportamiento de una persona en respuesta al movimiento estructural y la influencia dinámica resultante de estas alteraciones sobre las propiedades dinámicas de la estructura [5].

Desde de los sucesos ocurridos el día de la inauguración de los puentes *Millenium Bridge*, en Inglaterra y *Solferino Pasarelle*, en Francia, donde se presentaron problemas de vibraciones excesivas, que ocasionaron un sobrecosto y el cierre de las estructuras para su rehabilitación [6], se ha generado una discusión en la comunidad científica. Resulta necesario identificar las causas y los efectos de este fenómeno, en vista de que algunas normas, como la NSR 10 colombiana [7] ignoran la condición dinámica y naturaleza no estacionaria de las cargas antrópicas y las consecuencias que esto puede tener sobre la estructura. Aunque algunas guías de diseño internacionales como Setra [8], Eurocode [9], HIVOSS [10] e

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00035

ISO 10137 [11] han propuesto modelos para representar estas cargas y métodos para mitigar los efectos de este fenómeno, de manera numérica y experimental, la discusión aún sigue vigente y resulta preciso identificar cómo sucede esta interacción. Numéricamente se ha obtenido información sobre este fenómeno, aunque no se ha conseguido caracterizar totalmente, mientras que la realización de pruebas experimentales es poco factible para muchas instituciones, ya que requieren tiempo, alto costo y un gran número de personal y equipos.

La simulación híbrida (SH) es una técnica físico-cibernética utilizada para la evaluación experimental de sistemas dinámicos. Mosalam [12] y Thewalt [13] señalan la posibilidad de idealizar una estructura como un sistema de parámetros discretos, permitiendo calcular su respuesta dinámica y aplicar los desplazamientos obtenidos a la estructura en un procedimiento *on-line*. Para poner en práctica esta técnica es necesario realizar una subestructuración del problema, donde los componentes difíciles de modelar computacionalmente se prueban físicamente y son llamados subestructura experimental, y los componentes más fáciles de modelar son llamados subestructura numérica [14], [15]. Esto permite variar los modelos de sistema estructural, ofreciendo la posibilidad de realizar múltiples ensayos sobre estructuras diferentes [16]. Los ensayos de SH deben ser realizados usando un sistema de adquisición, que retroalimenta al sistema numérico, y un sistema de transferencia, descrito en [17], que debe estar compuesto de un suministro de potencia hidráulica, válvulas y sensores como elementos de control y elementos actuadores.

Para la realización de las pruebas experimentales de esta investigación se realiza una subestructuración en dos sistemas: el humano y el estructural, los cuales son subsistemas acoplados que interactúan entre sí. como lo planteado en los modelos numéricos de [18], [19] y [20]. Aunque se han realizado pruebas de marcha en caminadoras instrumentadas excitadas lateralmente por un simulador sísmico [21], [22] y [23], estas pruebas se han llevado a cabo sin tener en cuenta la retroalimentación existente en el fenómeno de IHE, es por eso que en esta investigación se evalúan los efectos de la IHE lateral en puentes peatonales mediante SH, usando el marco de pruebas de IHE y tomando como sistema de transferencia la mesa vibratoria de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle.

II. Interacción humano-estructura

La IHE es la alteración en el comportamiento de una persona en respuesta al movimiento estructural y la influencia dinámica resultante de estas alteraciones sobre las propiedades dinámicas de la estructura [5]. Tradicionalmente este fenómeno ocurre en estructuras flexibles como los puentes peatonales debido a su condición de esbeltez, baja masa, rigidez y amortiguamiento, como se plantea en esta investigación. Los efectos de este fenómeno son generalmente el condicionamiento de la serviciabilidad de la estructura y el desencadenamiento del fenómeno de resonancia, que ocurre cuando al caminar, la frecuencia de paso del peatón se acopla con la dinámica de la estructura flexible y se incrementa la amplitud de la respuesta de esta.

A. Sistema humano

La marcha humana se define como la capacidad de locomoción con series de movimientos alternos de las extremidades y el tronco que determinan el desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad [24]. Para describir la marcha humana es necesario conocer su cinemática, cinética y energía, lo cual suele ser difícil de modelar numéricamente, ya que intervienen procesos biológicos y las condiciones físicas y mentales de la persona. De manera habitual, la marcha humana se representa mediante modelos como el del péndulo invertido (MPI) [25], el basado en el punto de momento cero (ZMP) [26], entre otros. En esta investigación el sistema humano se representa por sujetos de prueba, con el fin de considerar la dinámica no lineal completa, transitoria y no estacionaria asociada a estas cargas.

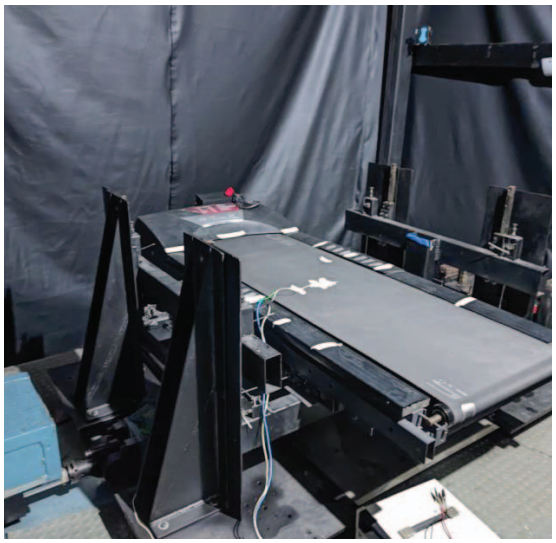


Fig. 1. Montaje experimental.

1) Cinemática: La cinemática estudia el movimiento de los cuerpos sin considerar las fuerzas que lo generan, ya sean internas o externas [27]. Para determinar el movimiento de cualquier segmento del cuerpo se requiere conocer 15 variables, de las cuales en este artículo solamente se consideran la posición y la velocidad lineal en el sentido longitudinal. Esta última se considera como un parámetro constante. Mediante este parámetro y el tiempo de la prueba, es posible calcular la posición de la persona a lo largo de la estructura flexible.

2) Cinética: Es el estudio de las fuerzas que generan el movimiento [27]. En esta investigación se calcularon las fuerzas laterales mediante un sistema de adquisición implementado en el marco de pruebas de IHE. La adquisición se lleva a cabo mediante celdas de carga con capacidad de 200 kg, para las cuales se hizo un proceso de calibración, acondicionándolas para tener la capacidad de retroalimentar el modelo numérico.

B. Sistema estructural (estructura flexible)

El sistema estructural para esta prueba consta de una viga simplemente apoyada de sección normal de 30x40 cm, con un largo de 15 m, compuesta de un concreto de peso normal con $f'c$ de 28 MPa. Esta viga fue diseñada para que sus tres primeras frecuencias naturales fueran valores cercanos a 1.00 Hz, 4.02 Hz y 9.04 Hz, respectivamente. Las frecuencias para cada modo de vibración son calculadas mediante (1) [28]. Esto

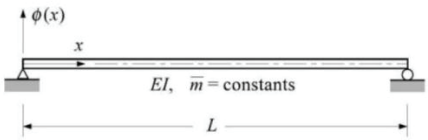


Fig. 2. Modelo simplificado del sistema estructural.

se hace con el fin de representar las condiciones de una estructura flexible susceptible a cargas dinámicas, cuya frecuencia fundamental es cercana a la frecuencia de paso de un peatón.

$$f_n = (\pi \cdot n)^2 / (2\,\pi)\ \sqrt{(EI/(mL^4))} \qquad (2)$$

Las propiedades dinámicas de este puente peatonal son definidas mediante (2-4), donde m_n es la masa del puente y m_p es la masa de la persona.

$$M_n = m_n + m_p\,\phi_n^2 \qquad (2)$$

$$K_n = \omega_n^2\, m_n \qquad (3)$$

$$C_n = 2\,\zeta_n\,\omega_n\,m_n \qquad (4)$$

La respuesta del puente es calculada usando (5). Se calculan los modos de vibración ϕ_n descritos por funciones sinusoidales para una viga simplemente apoyada (6). Haciendo uso de (7) se calcula en coordenadas generalizadas el movimiento del n-ésimo modo de vibración, cuyas frecuencias son calculadas a partir de (1).

$$\ddot{Y}_n(t) + 2\zeta_n\omega_n\dot{Y}_n(t) + \omega_n{}^2 Y_n(t) = \frac{P_n(t)}{M_n} \qquad (5)$$

$$\phi_n = sin(n\pi x/L) \qquad (6)$$

$$u(x,t) = \Sigma\,\phi_n(x)\ Y_n(t) \qquad (7)$$

III. Simulación Híbrida

La simulación híbrida es una técnica que combina experimentación física con simulación computacional vía intercambio de comunicación para evaluar experimentalmente sistemas complejos [16]. Para realizar esta prueba se divide el problema en dos subestructuras: experimental y numérica. En esta investigación, la primera es representada por sujetos de prueba, y la segunda mediante un modelo analítico de una estructura flexible. Estos sistemas se encuentran acoplados mediante un sistema de transferencia que corresponde al simulador sísmico, y a un sistema de adquisición para realizar la retroalimentación del modelo analítico (Fig. 3).

TABLE I. Propiedades físicas de los sujetos de prueba.

Sujeto	Masa (kg)	Estatura (m)
1	70.00	1.73
2	81.00	1.92
3	77.00	1.74

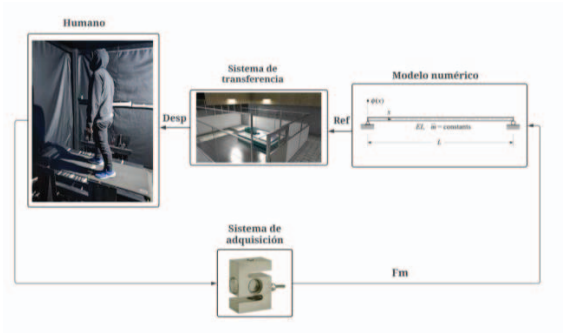


Fig. 3. Configuración de la SH.

El modelo numérico de la estructura flexible responde con un desplazamiento a las cargas antrópicas inducidas, enviando una señal de referencia al sistema de transferencia. Posteriormente, el sujeto de prueba reacciona al desplazamiento inducido, generando cargas que son medidas por las celdas de carga (F_m), obteniendo así la fuerza que retroalimenta al modelo analítico en cada paso del tiempo, en esta investigación se consideró una frecuencia de muestreo de 500 Hz.

El sistema experimental corresponde a tres personas con una masa promedio de 76.00 ± 4.55 kg y una estatura promedio de 1.80 ± 0.09 m. Las propiedades físicas de cada sujeto de prueba se pueden ver en la Tabla I. El sistema numérico corresponde a la estructura descrita en Sistema estructura (estructura flexible). El sistema de transferencia, que corresponde al simulador sísmico de la Universidad del Valle, replica físicamente la señal de referencia de la respuesta del modelo numérico. El simulador está conformado por una placa de aluminio de 1.1x1.5 m guiada por rieles lineales de baja fricción conectada a un actuador hidráulico de 45 kN, el cual tiene acopladas dos servo-válvulas con capacidad de 15 gpm cada una, conectadas a un potencial hidráulico de hasta 15.5 gpm. Además, el simulador cuenta con un transductor diferencial variable lineal (LVDT) interno, con el cual es posible medir la posición del vástago. La planta G_{HA} identificada para el sistema es señalada en (5), determinada mediante ensayos de barridos de frecuencia de 0.1-20 Hz, con una duración de 250 s y amplitudes constantes de 0.5, 1.0, 3.0 y 5.0 mm; encontrando un sistema continuo con un polo en el origen, una ganancia nominal de 14.0 y un retardo en el tiempo de 33 ms.

$$G_{HA} = \frac{14}{s}e^{-0.033s} \qquad (8)$$

El sistema de transferencia se encuentra implementado con un controlador robusto tipo H_∞ de seguimiento por desplazamiento, implementando un Filtro de Kalman con el fin de ayudar a reducir el ruido del LVDT y estabilizar en gran medida la SH, como se muestra en la Fig. 4. Este controlador fue diseñado bajo los lineamientos de implementación de la función *hinfstruc* de Matlab.

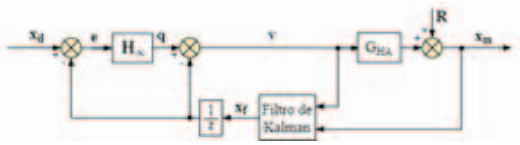


Fig. 4. Esquema de control del sistema de transferencia.

IV. DESARROLLO DE LA IHE CON SH

Las pruebas de IHE mediante SH determinaron la respuesta en aceleración y desplazamiento lateral en el centro de la luz y la percibida por los sujetos de prueba en cada instante de tiempo, las cuales se presentan en la Tabla II y en la

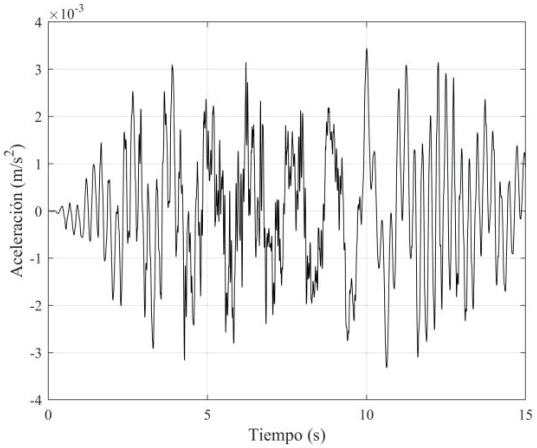
.

Los valores de aceleración calculados en el centro de la luz se comparan con los límites de aceleración para estructuras presentados en las normas internacionales Setra [8], Eurocode [9], HIVOSS [10] e ISO 10137 [11], lo que permite estimar los efectos que tiene la IHE sobre la serviciabilidad del sistema estructural descrito. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa la comparación de las aceleraciones máximas registradas para cada sujeto y el límite de aceleraciones propuesto por la norma ISO 10137. Dos de las tres aceleraciones se encuentran al límite de lo planteado por la norma ISO 10137.

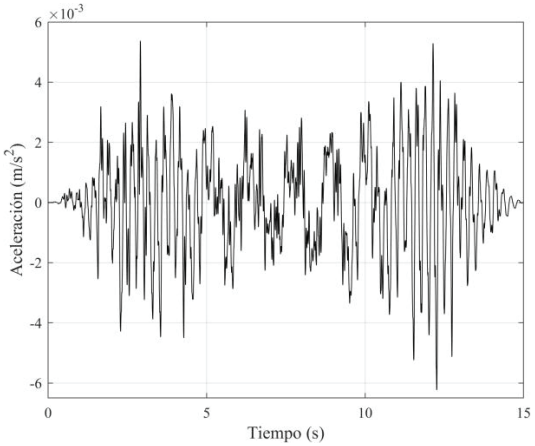
El cálculo de las aceleraciones percibidas por la persona es comparable con lo reportado en [29], donde se presentan rangos de comodidad para la marcha humana afectada por aceleraciones laterales (Tabla III). Los resultados de las pruebas muestran que, para el sistema estructural y humano considerados, las aceleraciones inducidas a la persona por parte de la estructura flexible no representan ningún inconveniente en el apartado de serviciabilidad.

TABLE II. ACELERACIONES Y DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS REGISTRADOS.

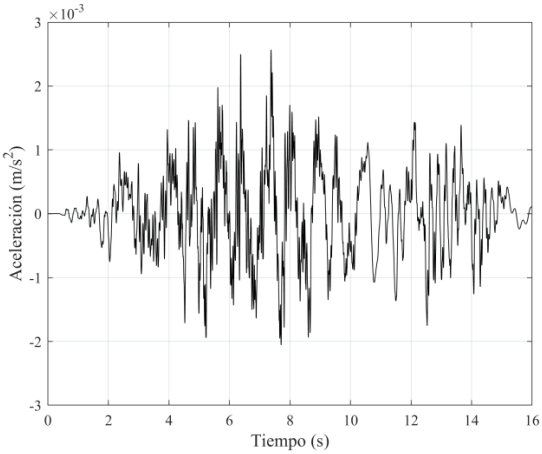
Sujeto	Aceleración máxima (m/s^2)		Desplazamiento máximo ($m \times 10^{-4}$)	
	Centro de la luz	Percibida por la persona	Centro de la luz	Percibida por la persona
1	0.0034	0.0062	1.0417	0.9758
2	0.0026	0.0032	0.6859	0.3976
3	0.0036	0.0054	1.0425	1.0285



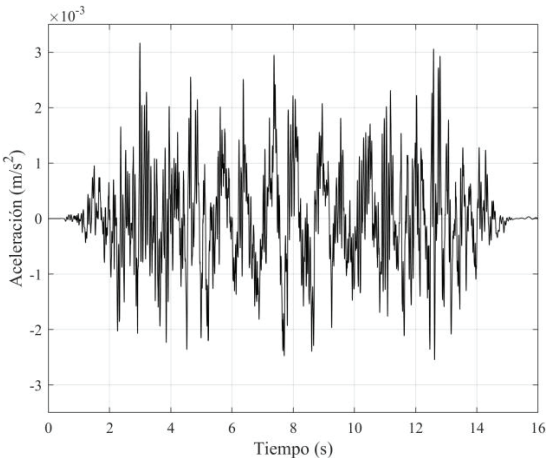
(a) Aceleración percibida en la mitad de la luz, sujeto 1.



(b) Aceleración percibida por el sujeto 1.



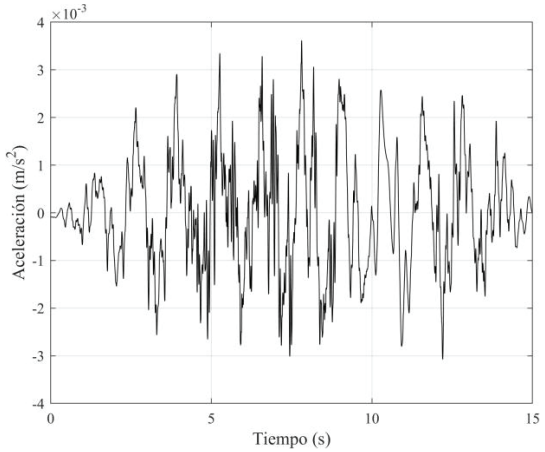
(c) Aceleración en la mitad de la luz, sujeto 2.



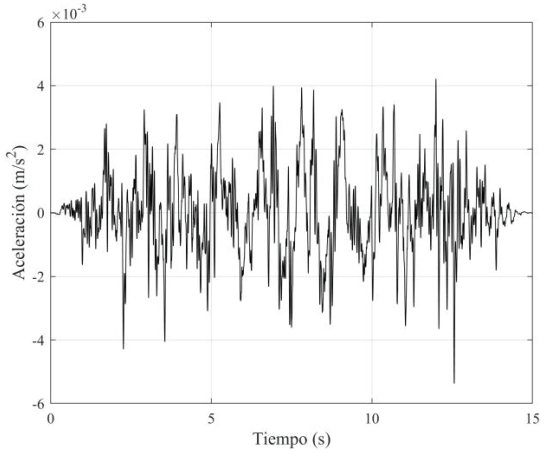
(d) Aceleración percibida por el sujeto 2.

V. DESEMPEÑO DE LA SH

Posterior a la realización de ensayos usando SH es posible evaluar el desempeño de esta. Factores presentes en la simulación ocasionan errores entre los resultados de la SH y los experimentales (9), (10). Se han propuesto índices para la evaluación de la precisión de la SH, entre los cuales se encuentra el índice de evaluación de frecuencia FEI, calculado



(e) Aceleración en la mitad de la luz, sujeto 3.



(f) Aceleración percibida por el sujeto 3.

Fig. 5. Aceleración obtenida para cada prueba

mediante (11), el cual compara la transformada rápida de Fourier de la señal de referencia (x_{ref}) y la señal medida (x_{med}). Además, se calcula la amplitud generalizada A_0, que evalúa la

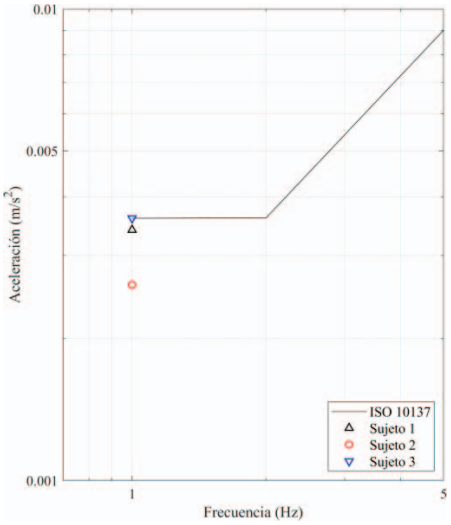


Fig. 6. Comparación de aceleraciones en la mitad de la luz con la norma ISO 10137.

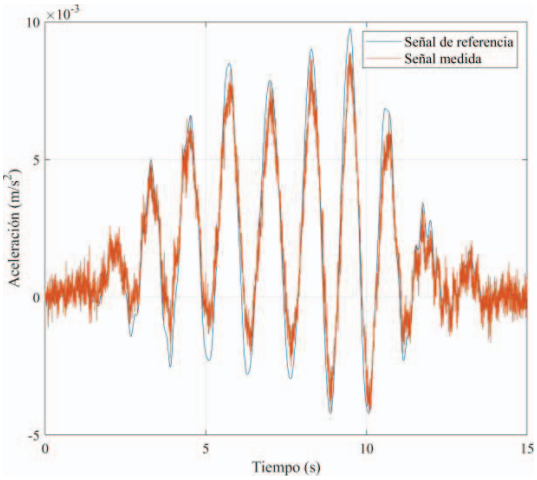


Fig.7. Comparación entre señal de referencia y señal medida.

TABLE III. LÍMITES DE COMODIDAD PARA LA MARCHA HUMANA.

	Rango de aceleraciones (m/s^2)
Tolerable	$a_{máx} < 0.30$
Leves dificultades	$0.3 < a_{máx} < 0.75$
Límite de servicio	$a_{máx} > 1.35$

correspondencia de amplitud entre las señales de referencia y medida, y se define mediante (12).

$$e_{DM} = \frac{|max(|u_{a,ref}(t)|) - max(|u_{a,med}(t)|)|}{max(|u_{a,ref}(t)|)} \quad (9)$$

$$e_{MD} = \frac{max(|u_{a,ref}(t) - u_{a,med}(t)|)}{max(|u_{a,ref}(t)|)} \quad (10)$$

$$FEI = \sum_{j=1}^{N} \left\{ \frac{x_{med}(j)}{x_{ref}(j)} \cdot \frac{\|x_{ref}(j)\|^l}{\sum_{i=1}^{N} \|x_{ref}(j)\|^l} \right\} \quad (11)$$

$$A_0 = \|FEI\| \quad (12)$$

Se obtuvo un error de 8.94%, con un valor de amplitud generalizada A_0 de 0.86. En la Fig. se observa la comparación entre las señales de referencia y medida.

VI. CONCLUSIONES

Aunque inicialmente se planteó la realización de una SH, dada la alta no linealidad del sistema humano y su dependencia a los cambios de velocidad que la afecta, se requirió la implementación de una configuración robusta de sistema de adquisición y sistema de transferencia, las cuales permitieron la realización de una simulación hibrida en tiempo real (SHTR).

Siguiendo los resultados de los parámetros de evaluación de la SH, se concluye que el sistema de transferencia hizo un buen seguimiento de la señal de referencia, con un error de 8.94% y una amplitud generalizada A_0 de 0.86.

Las aceleraciones registradas en el centro de la luz se compararon con los límites de aceleración propuestos por

normas internacionales. De esta comparación se observa que para el caso descrito de IHE lateral sobre una estructura flexible las aceleraciones se encuentran casi al límite de la norma ISO 10137, pero para las demás normas la respuesta está por debajo del límite de aceleración.

Respecto a la aceleración percibida por la persona durante la prueba de IHE, se puede concluir que la totalidad de la marcha fue realizada bajo una condición tolerable para el peatón, donde no se presentaron aceleraciones excesivas que afectaran la caminata considerablemente.

Este marco de trabajo propuesto para la evaluación de la IHE lateral en estructuras flexibles mediante SH es una herramienta base novedosa y rentable para futuras investigaciones donde, siguiendo una metodología similar, se pueden considerar modelos numéricos más complejos de estructuras flexibles, que permitan calcular adecuadamente los efectos de la IHE sobre ellas y sobre los peatones.

La elaboración del marco de pruebas y de trabajo permite la realización satisfactoria de pruebas de SH (incluso en tiempo real) para evaluar los efectos resultantes de la IHE lateral en estructuras flexibles, como la viga propuesta en esta investigación. Los parámetros usados para determinar el desempeño de la SH señalan que el error obtenido es muy bajo, es decir que el marco de trabajo es útil para la realización de más pruebas.

REFERENCES

[1] S. Živanović, A. Pavic, and P. Reynolds, "Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 279, no. 1–2, pp. 1–74, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.jsv.2004.01.019.

[2] F. Tubino, L. Carassale, and G. Piccardo, "Human-Induced Vibrations on Two Lively Footbridges in Milan," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 21, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000816.

[3] E. T. Ingólfsson, C. T. Georgakis, and J. Jönsson, "Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review," *Engineering Structures*, vol. 45. pp. 21–52, Dec. 2012. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.05.038.

[4] A. J. Pretlove and J. H. Rainer, "Human response to vibrations," in *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*, 1st ed., Basilea: Birkhäuser, 1995, pp. 215–218.

[5] S. P. Carroll, J. S. Owen, and M. F. M. Hussein, "Reproduction of lateral ground reaction forces from visual marker data and analysis of balance response while walking on a laterally oscillating deck," *Engineering Structures*, vol. 49, pp. 1034–1047, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.028.

[6] P. Dallard *et al.*, "London Millenium Bridge: Pedestrian-induced lateral vibration," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 412–417, Nov. 2001, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(412).

[7] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10," 2010.

[8] F. Sétra, "Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading," Paris, 2006. [Online]. Available: http://www.afgc.asso.fr

[9] British Standards Institution (BSI), "UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures—Part 2: Traffic loads on bridges," Londres, 2008.

[10] HIVOSS, "Human Induced Vibration of Steel Structures. Desing of Footbridges.," Porto, Portugal, 2009.

[11] ISO 10137, "Bases for Design of Structures-Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations," Ginebra, Suiza, 2007.

[12] K. M. Mosalam, R. N. Whites, and G. Ayala, "Response of infilled frames using pseudo-dynamic experimentation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 27, pp. 589–608, 1998.

[13] C. Thewalt, "Performance parameters for pseudodynamic tests," *Journal of Structural Engineering*, vol. 120, no. 9, pp. 2768–2781, 1994.

[14] A. Maghareh, C. E. Silva, and S. J. Dyke, "Servo-hydraulic actuator in controllable canonical form: Identification and experimental validation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 100, pp. 398–414, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.07.022.

[15] P. L. Drazin, S. Govindjee, and K. M. Mosalam, "Hybrid Simulation Theory for Continuous Beams," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 141, no. 7, p. 04015005, Jul. 2015, doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000909.

[16] N. Nakata *et al.*, "Hybrid Simulation Primer and Dictionary," Jan. 2014.

[17] Y. Qian, G. Ou, A. Maghareh, and S. J. Dyke, "Parametric identification of a servo-hydraulic actuator for real-time hybrid simulation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 48, no. 1–2, pp. 260–273, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ymssp.2014.03.001.

[18] D. Gomez, S. J. Dyke, and S. Rietdyk, "Experimental Verification of a Substructure-Based Model to Describe Pedestrian–Bridge Interaction," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 23, no. 4, p. 04018013, Apr. 2018, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001204.

[19] E. Ahmadi, C. Caprani, S. Živanović, N. Evans, and A. Heidarpour, "A framework for quantification of human-structure interaction in vertical direction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 432, pp. 351–372, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jsv.2018.06.054.

[20] K. van Nimmen, A. Pavic, and P. van den Broeck, "A simplified method to account for vertical human-structure interaction," *Structures*, vol. 32, pp. 2004–2019, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.03.090.

[21] H. Yang, B. Wu, J. Li, Y. Bao, and G. Xu, "A spring-loaded inverted pendulum model for analysis of human-structure interaction on vibrating surfaces," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 522, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116727.

[22] M. Bocian, J. F. Burn, J. H. G. Macdonald, and J. M. W. Brownjohn, "From phase drift to synchronisation – pedestrian stepping behaviour on laterally oscillating structures and consequences for dynamic stability," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 392, pp. 382–399, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2016.12.022.

[23] S. Nakamura, T. Kawasaki, H. Katsuura, and K. Yokoyama, "Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 2, pp. 247–252, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2007.05.011.

[24] I. Agudelo, A. Mendoza, and J. P. Ruiz, "Marcha: Descripción, Métodos, Herramientas de Evaluación y Parámetros de Normalidad Reportados en la Literatura," vol. 1, no. 1, pp. 29–43, 2013.

[25] M. A. Lafortune, P. R. Cavanagh, H. J. Sommer, and A. Kalenak, "Three-dimensional kinematics of the human knee during walking," *Journal of Biomechanics*, vol. 25, no. 4, pp. 347–357, 1992.

[26] S. Kajita, *et al.* "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, 2003, pp. 1620–1626.

[27] D. A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement*. Wiley, 2009.

[28] R. W. Clough and J. Penzein, *Dynamics of structures*, 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, 1993. Accessed: Dec. 20, 2021. [Online].

[29] S. Nakamura, "Field measurements of lateral vibration on a pedestrian suspension bridge," *The Structural Engineer*, vol. 81, no. 22, pp. 22–26, 2003.

Three-dimensional model with inverse dynamics of human gait: reaction forces on rigid surface

Modelo tridimensional con dinámica inversa de la marcha humana: fuerzas de reacción sobre superficie rígida

Juan Diego Aux
Escuela de ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Cali, Colombia
juan.aux@correounivalle.edu.co

Bryan Castillo
Escuela de ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Cali, Colombia
bryan.castillo@correounivalle.edu.co

Johan Arana
Escuela de ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Cali, Colombia
johan.arana@correounivalle.edu.co

Peter Thomson
Escuela de ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Cali, Colombia
peter.thomson@correounivalle.edu.co

***Abstract*—A complete three-dimensional model of the human body representative of human walking on a flat surface was developed using optimization techniques and inverse dynamics. The optimization was guided by biomechanical constraints and conditioned to energy minimization during a gait cycle. The results show that this model adequately predicts the kinematics and kinetics of human gait in the sagittal, coronal and frontal planes. In addition, the ground reaction forces, and associated centers of pressure are like those reported in other investigations. The results suggest that the solution with the lowest energy consumption represents the most natural gait, which corroborates the hypothesis of energy minimization as a goal in biological processes, including human gait. The loads simulated by this model have the potential to be applicable in dynamic analysis of structures with high susceptibility to vibrations due to the influence and concurrence of anthropic loads, as is the case of bridges, grandstands and slabs.**

Keywords—Three-model, Gait simulation, Inverse dynamics, optimization, whole body.

***Resumen* — Un modelo tridimensional completo del cuerpo humano representativo de la marcha humana sobre una superficie plana fue desarrollado utilizando técnicas de optimización y dinámica inversa. La optimización fue orientada mediante restricciones biomecánicas y condicionado a la minimización energética durante un ciclo de marcha. Los resultados muestran que este modelo predice adecuadamente la cinemática y cinética de la marcha humana en los planos sagital, coronal y frontal. Además, las fuerzas de reacción del suelo y los centros de presión asociados a estas son similares a los reportados en otras investigaciones. Los resultados sugieren que la solución con el menor consumo energético representa la forma de marcha más natural, lo anterior corrobora la hipótesis de una minimización de la energía como objetivo en los procesos biológicos, incluido entre ellos, la marcha humana. Las cargas simuladas por este modelo tienen el potencial de ser aplicables en análisis dinámicos de estructuras con alta susceptibilidad a vibraciones debido a la influencia y concurrencia de las cargas antrópicas, como es el caso de puentes, graderías y losas.**

Palabras claves —Modelo tridimensional, Simulación de marcha, Dinámica inversa, cuerpo humano completo.

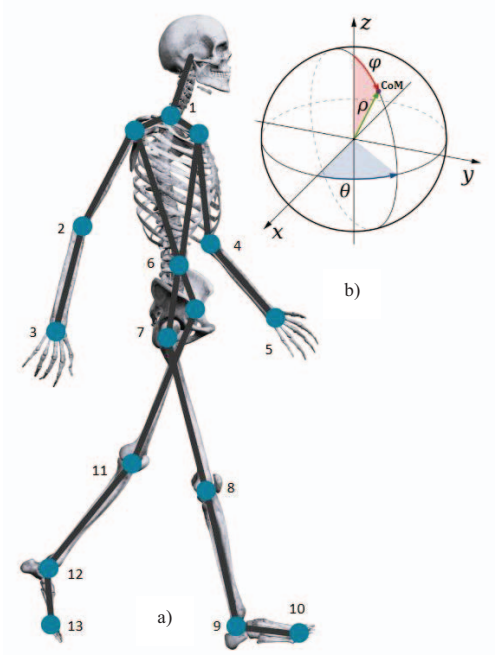


Fig. 1. a) Modelo cuerpo humano. b) Representación ángulos articulares en el marco de referencia global.

I. INTRODUCCIÓN

Diversos modelos de marcha humana han sido utilizados en diferentes campos de la ingeniería, como la bioingeniería [1]-[3], la biomecánica [4]-[7], la biomedicina [8]-[9], la robótica [10]-[14] y en la estimación de respuesta dinámica de las estructuras civiles ante cargas antrópicas y su influencia en la forma de locomoción del transeúnte, fenómeno más conocido como, interacción humano-estructura (IHE) [15]-[22]. La simulación de la marcha humana es un problema complejo desde el punto de vista

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00036

Nomenclatura			
θ_j, φ_j	Desplazamiento angular en el plano sagital y frontal de la articulación *j-ésima*	x_{an}, Y_{an}, Z_{an}	Coordenadas del centro articular del tobillo
$\dot{\theta}_j, \dot{\varphi}_j$	Velocidad angular en el plano sagital y frontal de la articulación *j-ésima*	$\ddot{x}_{an}, \ddot{Y}_{an}, \ddot{Z}_{an}$	Aceleración del centro articular del tobillo
$\ddot{\theta}_j, \ddot{\varphi}_j$	Aceleración angular en el plano sagital y frontal de la articulación *j-ésima*	x_i, y_i, z_i	Posición lineal del centro articular *i-ésimo*
$a_0^{(j)}$, $a_n^{(j)}, b_n^{(j)}$	Coeficientes de la serie de Fourier	$\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$	Aceleración lineal del centro articular *i-ésimo*
n, j	Número de elementos y nodos del modelo	l_j	Longitud del elemento *i-ésimo*
ω_c, T_p	Frecuencia y periodo de marcha	$\vec{a}_i$	Vector de aceleración lineal del elemento *i-ésimo*
E_m	Energía mecánica	$\vec{F}_{ji}$	Vector de fuerza del elemento *i-ésimo* en la articulación *j-ésima*
$\omega_p{}^{(i)}, \omega_d{}^{(i)}$	Velocidad angular de elemento proximal y distal[1], *i-ésimo*	$\vec{F}_{ei}$	Vector de fuerza externa en el elemento *i-ésimo*
T_i	Torque neto del nodo *i-ésimo*	$CoP_{l,r}(t)$	Centros de presión izquierdo y derecho
m_i	Masa del elemento *i-ésimo*	T_i	Torque muscular sobre el elemento *i-ésimo*
$\vec{g}$	Vector de gravedad	$\vec{F}_{gi}, M_{gi}$	Fuerzas y momentos de reacción actuando sobre el pie derecho o izquierdo
I_i	Momento de Inercia del elemento *i-ésimo*	ω, T_c	Frecuencia y periodo de caminata
M_{ji}	Momento muscular sobre el elemento *i-ésimo* en la articulación *j-ésima*	$\omega_p^{(i)}, \omega_d^{(i)}$	Velocidad angular en el punto proximal y distal del elemento *i-ésimo*
M_{ei}	Momento muscular externo sobre el elemento *i-ésimo*	V_a	Velocidad promedio de caminata
M_{ki}	Momento de la fuerza resultante en la *k-ésima* articulación sobre el elemento *i-ésimo*	μ	Coeficiente de fricción entre en pie en contacto con la superficie
y_{tip}	Punto más bajo de los pies izquierdo y derecho		

analítico y computacional [23], debido a la condición transitoria, no estacionaria y a la variabilidad biológica de la marcha humana. En la literatura, algunos investigadores han realizado varios avances en la representación numérica de la marcha humana realista y precisa, utilizando modelos mecánicos como el de péndulo invertido (MPI) [2],[3],[10],[13],[17]; el método basado en el punto de momento cero (ZMP) [24]; entre otros [25]-[26]. En los últimos años, se ha generado una tendencia hacia la implementación de técnicas de optimización enfocadas en la minimización de energía durante la marcha para su simulación [6],[22],[27]. Aunque la metodología anterior, tiene un gran costo computacional, el desarrollo de nuevas técnicas, novedosos algoritmos numéricos y hardware robusto han posicionado a los métodos basados en optimización como una alternativa confiable, asequible y rentable para la simulación de la marcha humana, debido a que pueden considerar, entre algunos aspectos, varios grados de libertad (GDL) y se pueden incluir más variables de diseño en la formulación de optimización.

Dentro del campo de la modelación de la marcha humana mediante técnicas de optimización, existen dos métodos principales: dinámica directa e inversa. La principal problemática del método de dinámica directa es el elevado requerimiento de procesamiento en CPU, siendo ejemplo el modelo desarrollado por [27], teniendo un tiempo de simulación aproximado de 10.000 horas. Por este motivo el método de dinámica inversa se ha convertido en una alternativa muy atractiva para el desarrollo de modelos de marcha humana basado en técnicas de optimización.

Debido a la complejidad y demandas computacionales, la mayoría de los autores han limitado sus estudios de la predicción de la marcha a modelos en el plano sagital y simplificando el cuerpo humano a una cantidad menor de segmentos corporales [6]. Sin embargo, algunos autores adoptaron modelos tridimensionales como [1] quien en su modelo predijo algunos movimientos del cuerpo a partir de otros conocidos experimentalmente. Luego, [28] limitó su modelo al supuesto de la alternancia en el contacto de las piernas y a la restricción de giro del pie en el plano coronal. Por lo tanto, se evidencia que aún existe la necesidad de desarrollar modelos tridimensionales robustos capaces de estimar la cinemática y cinética de la marcha humana que permita profundizar en la evaluación de las cargas antrópicas y su implementación en estudios generales de la ingeniería.

En esta investigación, se propone el desarrollo de un modelo tridimensional de dinámica inversa basado en técnicas de optimización energética con el objetivo de calcular la cinemática y cinética de la marcha humana sobre una superficie rígida.

II. METODOLOGÍA

A. *Antropometría*

Para el desarrollo de esta investigación se usó como referencia las variables antropométricas para un sujeto de prueba de 80 kg y 1.75 m de altura, presentadas en [29]. Tabla I.

B. *Cinemática*

A partir del trabajo realizado por [6], el cuerpo humano fue modelado como un sistema compuesto por trece elementos rígidos (segmentos corporales), conectados mediante articulaciones que permiten el giro libre en los tres planos (sagital, frontal y coronal). Fig. 1.a.

El sistema de coordenadas esféricas fue utilizado para determinar las posiciones de los segmentos corporales a lo

TABLA I. DATOS ANTROPOMÉTRICOS

	Cabeza	*Humero Izq.*	*Antebr. Izq.*	*Humero Der.*	*Antebr. Der.*	*Torso*	*Cadera*	*Muslo izq.*	*Pant. izq.*	*Pie izq.*	*Muslo Der.*	*Pant. Der.*	*Pie Der.*
Masa [%]	6.94	2.71	1.62	2.71	1.62	32.29	11.17	14.16	4.33	1.37	14.16	4.33	1.37
Longitud [mm]	203.3	281.7	268.9	281.7	268.9	386.2	145.7	422.2	434	190	422.2	434	190
CoM [%]	50.02	57.72	67.51	57.72	67.51	49.85	38.85	40.95	43.95	44.15	40.95	43.95	44.15
Ratio Sag.	30.3	28.5	43.88	28.5	43.88	33.74	61.5	32.9	25.1	25.7	32.9	25.1	25.7
Ratio Trans.	26.1	15.8	12.31	15.8	12.31	23.4	58.7	14.9	10.2	24.5	14.9	10.2	24.5
Ratio Fron.	31.5	26.9	42.93	26.9	42.93	29.1	55.1	32.9	24.6	12.4	32.9	24.6	12.4

Adaptado de [29]

largo de un ciclo de marcha, donde la orientación de cada uno de los segmentos corporales está definida por el ángulo θ_i, φ_i, con respecto al sistema de referencia global. Fig. 1.b.

Un ciclo completo de marcha comprende cuatro fases, que son: fase de doble apoyo inicial, fase de balanceo o apoyo sencillo izquierdo, fase de doble apoyo medio y la fase de balanceo o apoyo sencillo [30]. Por consiguiente, al menos un pie está en contacto con el suelo durante todo el ciclo de marcha. Así, las posiciones de los centros articulares de cada uno de los segmentos corporales se calculan a partir de la posición del centro articular del tobillo en contacto (1).

$$\begin{cases} x_i = x_{an} + \sum_{i=1}^{13} \left(I(j) l_j \cos\theta_j \cos\varphi_j \right) \\ y_i = y_{an} + \sum_{i=1}^{13} \left(I(j) l_j \sin\theta_j \cos\varphi_j \right) \\ z_i = z_{an} + \sum_{i=1}^{13} \left(I(j) l_j \sin\varphi_j \right) \end{cases} \quad (1)$$

Donde, X_{an}, Y_{an}, Z_{an} corresponden a las posiciones del tobillo en los ejes de referencia x, y, z, respectivamente. Por otro lado, L_i corresponde a la longitud del elemento iesimo y finalmente $I(j)$ corresponde a una función signo, la cual es igual a uno cuando el segmento corporal corresponde a la pierna en contacto.

Respecto a las posiciones de los tobillos en el sentido vertical y en la dirección de avance de la caminata, se utilizó la propuesta de [6], en la cual la posición del centro articular del tobillo está definida en función de su ángulo de giro respecto al quinto metatarsiano.

Para el caso de la cinemática en la dirección lateral del tobillo, se determinó bajo el supuesto de que la aceleración lateral del tobillo debía tener un comportamiento similar a la aceleración total del cuerpo en este sentido durante el ciclo de marcha. Fig. 2.

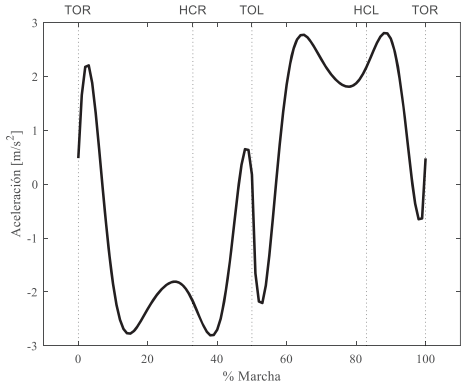


Fig. 2. Aceleración lateral del centro articular del tobillo durante un ciclo completo de marcha.

La aceleración, fue integrada numéricamente para conocer la posición y luego aproximada a una serie de Fourier que muestra la trayectoria del centro articular del tobillo Fig. 3.

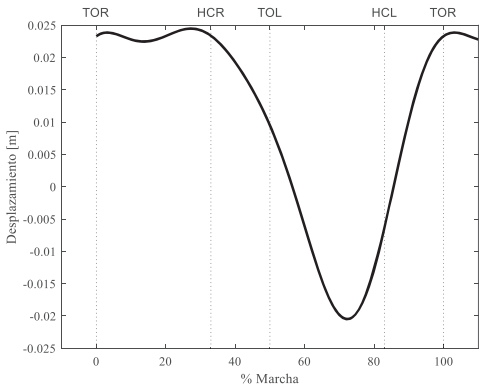


Fig. 3. Trayectoria del centro articular del tobillo durante un ciclo completo de marcha.

Conocida la cinemática del centro articular del tobillo, derivando dos veces (1), las aceleraciones de cada segmento corporal respecto al centro articular del tobillo son:

$$\ddot{x}_i = \ddot{x}_{an} + \sum_{i=1}^{13}\Big\{-I(j)I_j\Big[\cos\theta_j\left(\ddot{\varphi}_j\sin\varphi_j + \dot{\varphi}_j{}^2\cos\varphi_j\right) - 2\dot{\varphi}_j\sin\varphi_j\,\dot{\theta}_j\sin\theta_j + \cos\varphi_j\left(\ddot{\theta}_j\sin\theta_j + \dot{\theta}_j{}^2\cos\theta_j\right)\Big]\Big\}$$

$$\ddot{y}_i = \ddot{y}_{an} + \sum_{i=1}^{13}\Big\{-I(j)I_j\Big[\sin\theta_j\left(\ddot{\varphi}_j\sin\varphi_j + \dot{\varphi}_j{}^2\cos\varphi_j\right) + 2\dot{\varphi}_j\sin\varphi_j\,\dot{\theta}_j\cos\theta_j + \cos\varphi_j\left(\ddot{\theta}_j\cos\theta_j + \dot{\theta}_j{}^2\sin\theta_j\right)\Big]\Big\} \quad (2)$$

$$\ddot{z}_i = \ddot{z}_{an} + \sum_{i=1}^{13}\Big\{I(j)I_j\Big[\varphi_j\cos\varphi_j - \dot{\varphi}_j{}^2\sin\varphi_j\Big]\Big\}$$

Por lo tanto, obtenidos los ángulos de los segmentos corporales, (1) y (2) se utilizaron para calcular las coordenadas de cada uno de los centros articulares y sus aceleraciones. A partir de entonces, la posición y aceleración de cada centro de masa del elemento corporal fueron encontrados utilizando los datos antropométricos de la TABLA I.

C. Cinética

El método de dinámica inversa se empleó para calcular la cinética conjunta y el gasto de energía mecánica durante un ciclo de marcha. Dado que, en el modelo predictivo, las reacciones de suelo se desconocen inicialmente, el método de dinámica inversa se basó únicamente en los movimientos de los segmentos corporales, las ecuaciones de movimiento del segmento *i-ésimo* del cuerpo, se pueden escribir como:

$$m_i\vec{a}_i = \sum_{j=1}^{n_i}\vec{F}_{ji} + \vec{F}_{ei} + m_i\vec{g} \quad (3)$$

$$I_i\alpha_i = \sum_{j=1}^{n_i}M_{ji} + M_{ei} + \sum_{k=1}^{n_i}M_{ki} \quad (4)$$

Mediante la combinación de las ecuaciones de movimiento de todos los elementos del cuerpo y la suma de las fuerzas externas, los momentos asociados pueden ser calculados. Dado que, durante la marcha, las únicas fuerzas externas y momentos que actúan sobre el cuerpo humano, exceptuando la gravedad, son las reacciones del suelo, estas expresiones se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\sum\vec{F}_i = \sum_{i=1}^{n}m_i\left(\vec{a}_i - \vec{g}\right) \quad (5)$$

$$\sum M_i = \sum_{i=1}^{n}I_i\alpha_i - \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n_i}M_{ki} \quad (6)$$

Durante la fase de balanceo, un solo pie está en contacto con el suelo, sea derecho o izquierdo, por lo tanto, las reacciones del suelo (fuerzas, momentos y COPs) que actúan sobre único el pie de apoyo se pueden calcular directamente de (3) y (4). Sin embargo, en la fase de doble apoyo, las reacciones del suelo son indeterminadas. Para resolver este problema, se ha utilizado el supuesto de transferencia lineal propuesto por [6] para modelar la transferencia de reacciones del suelo de un pie a otro durante la fase de apoyo doble.

D. Optimización

Se empleó un conjunto de series Fourier de quinto orden para representar las rotaciones segmentales, lo que resultó en un total de 11 coeficientes para cada segmento, los cuales se utilizaron como parámetros de optimización:

$$\theta_i = a_o + \sum_{i=1}^{n}\left[a_n^{(i)}\cos(n\omega_c t) + b_n^{(i)}\sin(n\omega_c t)\right] \quad (7)$$

En el proceso de optimización se definieron parámetros iniciales de marcha como son: velocidad promedio de caminata, frecuencia de caminata, y duración de apoyo doble. Además, se implementaron restricciones biomecánicas que impiden hiperextensiones articulares u otros movimientos poco realistas. TABLA II.

TABLA II. CARACTERISTICAS DE LA OPTIMIZACIÓN

Función de Costo	$E_m = \int_0^{Tc}\sum_{i=1}^{n}\left\|T_i\left(\omega_p - \omega_d\right)\right\|dt.$
Restricciones	***Movimiento de los elementos*** $0 \le \theta_i(t) \le \pi,\ t \in [0, T_c](i = 1,2,\ldots,13).$
	Giro relativo las rodillas $\theta_{min}^{(1)} \le \theta_8(t) - \theta_9(t) \le \theta_{max}^{(1)},$ $\theta_{min} \le \theta_{11}(t) - \theta_{10}(t) \le \theta_{max},\ t \in [0.T_c].$
	Giro relativo los brazos $\theta_{min} \le \theta_2(t) - \theta_3(t) \le \theta_{max},$ $\theta_{min}^{(2)} \le \theta_5(t) - \theta_4(t) \le \theta_{max}^{(2)},\ t \in [0.T_c].$
	Restricción de Contacto del pie $y_{tip}(t) > 0\ en\ fase\ de\ balanceo,$ $Y_{tip}(t) = 0,\ cuando\ esta\ apoyado$
	Restricciones cinéticas

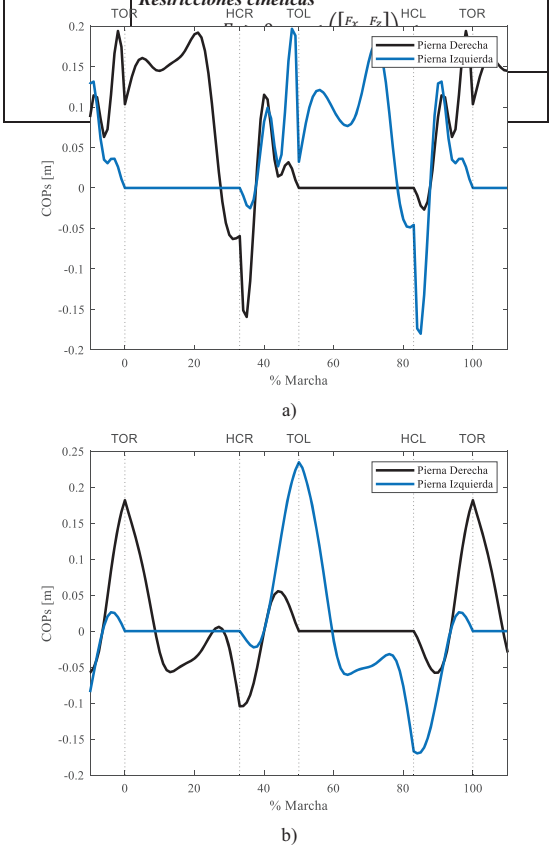


Fig. 4. Centros de Presión (COPs). a) Dirección longitudinal. b) Dirección lateral. Para un sujeto de prueba de 80 kg, velocidad de caminata de 1.5 m/s y fase de apoyo doble del 33 al 50% de un ciclo de marcha. Energía 202 J.

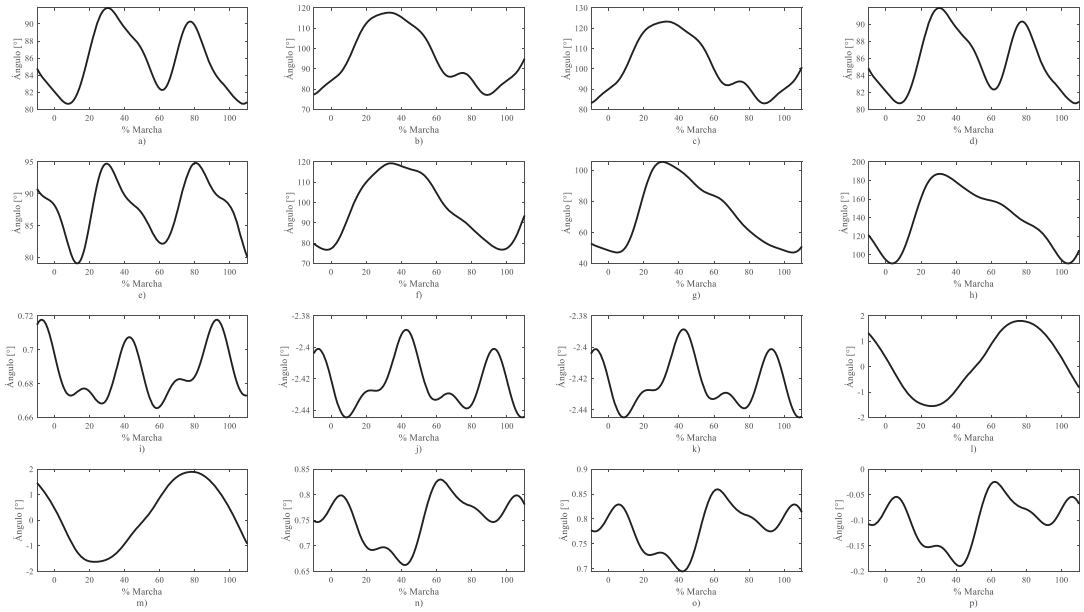


Fig. 5. Rotación de los segmentos corporales plano sagital. a) Cabeza. b) Brazo. c) Antebrazo. d) Tronco superior. e) Cadera. f) Humero. g) Pantorrilla. h) Píe. Rotación segmentos corporales plano frontal. i) Cabeza. j) Brazo. k) Antebrazo. l) Tronco superior. m) Cadera. n) Humero. o) Pantorrilla. p) Píe. Para un sujeto de prueba de 80 kg, velocidad de caminata de 1.5 m/s y fase de apoyo doble del 33 al 50% de un ciclo de marcha. Energía 202 J.

Se utilizó el algoritmo de optimización *interior-point* con la función *fmincon* del lenguaje Matlab en un computador con las siguientes características: sistema operativo Windows 11 Pro de 64 bits, procesador AMD Ryzen 3900X @3.97 GHz y memoria RAM 32.0 GB. La función objetivo se reduce en encontrar las trayectorias de los elementos que logren parámetros de marcha especificados, minimizando al mismo tiempo el gasto de energía mecánica y satisfaciendo las restricciones asociadas presentadas en la TABLA II. Como punto inicial se tomaron diversos puntos aleatorios con el fin de encontrar un mínimo global adecuado, ya que, debido a la condición no lineal de la marcha humana y la cantidad de coeficientes definidos, existen varios mínimos locales.

III. RESULTADOS

Distintas familias de coeficientes se encontraron como solución al problema de optimización. Aunque estas cumplen con el objetivo propuesto, cada una representa un mínimo local y las pequeñas diferencias entre ellas están relacionadas con la precisión del proceso de optimización y la sensibilidad de la función objetivo cercana al mínimo global. Sin embargo, la solución con el menor consumo de energía (202.1 Julios) es el patrón de marcha que reproduce movimientos del cuerpo más naturales y realistas, lo que evidencia que, como expresan algunos autores, la minimización del consumo de energía es una característica natural de los procesos biológicos, entre ellos la marcha humana [31],[32].

Los movimientos de los segmentos corporales se presentan en la Fig. 5, siguiendo patrones normales y manteniéndose dentro de los límites que permiten las articulaciones, reportados en algunas investigaciones como [33].

Las fuerzas de reacción del suelo presentadas en la Fig. 4, siguen la forma típica reportada en la literatura y la presencia de tres picos en la fuerza vertical en lugar de dos, se debe principalmente a la rigidez de los eslabones que componen el sistema biomecánico humano y la velocidad de marcha a la cual se realizó la simulación Fig. 6.a. Además, los COPs se mantienen dentro de los limites aceptables, es decir no se reportan valores superiores a la dimensión del pie.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta investigación, se desarrolló un modelo tridimensional de dinámica inversa basado en técnicas de optimización energética con el objetivo de calcular la cinemática y cinética de la marcha humana sobre una superficie plana rígida. El movimiento de los segmentos corporales y las fuerzas de reacción del suelo fueron estimados mediante tres características definidas de la marcha: velocidad media, frecuencia y longitud de paso. Además, ningún movimiento fue sobreimpuesto, lo que permite obtener movimientos corporales naturales, solo limitándolos a hiperextensiones físicamente irreales.

La energía mínima encontrada en este modelo es menor respecto a la de [6], suponemos, debido a la inclusión de los segmentos corporales superiores en este modelo y la tridimensionalidad del mismo, lo que lleva a un menor movimiento del tronco en comparación. Por otro lado, para garantizar la estabilidad del centro de masa y el equilibro, el movimiento de los brazos es similar al de las extremidades inferiores.

El uso de dinámica inversa, en contraste con la dinámica directa, tiene varias ventajas, entre ellas su eficiencia computacional, importante para los modelos predictivos basados en técnicas de optimización. Dado que no hay ninguna integración numérica de las ecuaciones diferenciales, el tiempo de ejecución para cada iteración de optimización se reduce considerablemente. Otra ventaja de la dinámica inversa es la implementación más simple de las

restricciones asociadas con la caminata. El modelo propuesto en este estudio requiere 2 minutos de tiempo de CPU para converger a una solución de energía mínima.

Se desarrolla una condición de marcha bípeda que estima las fuerzas de reacción en los tres planos principales, aunque la fuerza vertical Fig. 6.a. tiene una diferencia significativa en la cantidad de picos que se han reportado para fuerza. Sin embargo, esta condición se presenta en modelos con alta rigidez de las piernas a bajas velocidades de marcha y entre más baja sea la velocidad, más picos se producen en la forma de la fuerza [34].

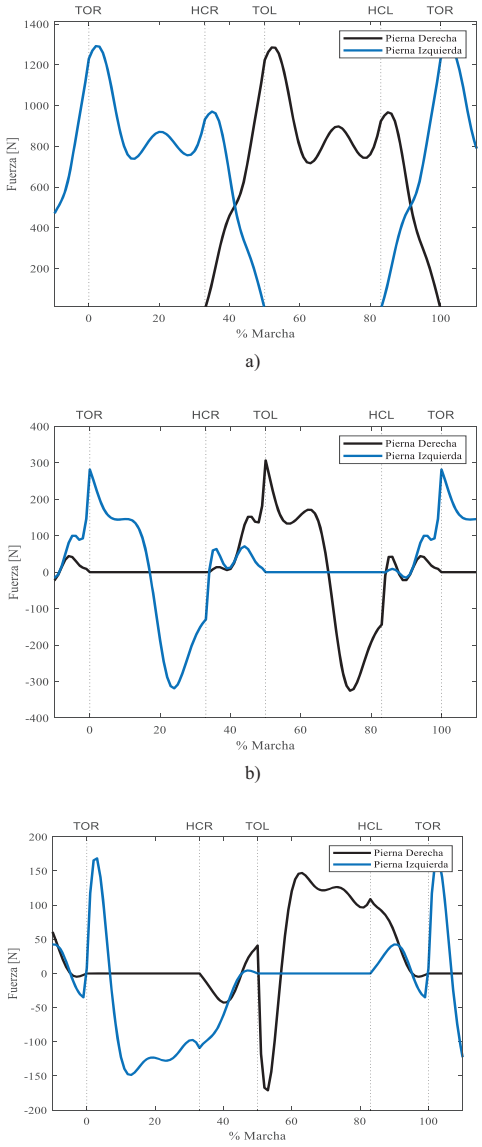


Fig. 6. Fuerzas de reacción del suelo durante un ciclo de marcha a) Dirección vertical. b) Dirección longitudinal. c) Dirección lateral. Para un sujeto de prueba de 80 kg, velocidad de caminata de 1.5 m/s y fase de apoyo doble del 33 al 50% de un ciclo de marcha. Energía 202 J.

REFERENCIAS

[1] H. F. Koopman, The Three-Dimensional Analysis and Prediction of Human Walking, Edizione Pro Juventute, Milan, Italy, 1991.

[2] M. A. Lafortune, P. R. Cavanagh, H. J. Sommer, and A. Kalenak, "Three-dimensional kinematics of the human knee during walking," *Journal of Biomechanics*, vol. 25, no. 4, pp. 347–357, 1992.

[3] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by a simple three-dimensional inverted pendulum model," *Advanced Robotics*, vol. 17, no. 2, pp. 131–147, 2003.

[4] P. G. Adamczyk, S. H. Collins, and A. D. Kuo, "The advantages of a rolling foot in human walking," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 20, pp. 3953–3963, 2006.

[5] H. Geyer, A. Seyfarth, and R. Blickhan, "Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 273, no. 1603, pp. 2861–2867, 2006.

[6] L. Ren, R. K. Jones, and D. Howard, "Predictive modelling of human walking over a complete gait cycle," *Journal of Biomechanics*, vol. 40, no. 7, pp. 1567–1574, 2007.

[7] S. Kim and S. Park, "Leg stiffness increases with speed to modulate gait frequency and propulsion energy," *Journal of Biomechanics*, vol. 44, no. 7, pp. 1253–1258, 2011.

[8] M. A. Sharbafi, H. Barazesh, M. Iranikhah, and A. Seyfarth, "Leg force control through biarticular muscles for human walking assistance," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 12, p. 39, 2018.

[9] G. Zhao, M. Ahmad Sharbafi, M. Vlutters, E. van Asseldonk, and A. Seyfarth, "Bio-inspired balance control assistance can reduce metabolic energy consumption in human walking," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 27, no. 9, pp. 1760–1769, 2019.

[10] M. A. Sharbafi, C. Maufroy, H. M. Maus, A. Seyfarth, M. N. Ahmadabadi, and M. J. Yazdanpanah, "Controllers for robust hopping with upright trunk based on the virtual pendulum concept," in *Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2222–2227, Algarve, Portugal, October 2012.

[11] M. A. Sharbafi and A. Seyfarth, "VBLA, a swing leg control approach for humans and robots," in *Proceedings of 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 952–957, Cancun, Mexico, November 2016.

[12] C. Schumacher, M. Sharbafi, A. Seyfarth, and C. Rode, "Biarticular muscles in light of template models, experiments and robotics: a review," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 17, no. 163, Article ID 20180413, 2020.

[13] L. Li, Z. Xie, X. Luo, and J. Li, "Trajectory planning of flexible walking for biped robots using linear inverted pendulum model and linear pendulum model," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1082, 2021.

[14] X. Shi, J. Gao, Y. Lu, D. Tian, and Y. Liu, "Biped walking based on stiffness optimization and hierarchical quadratic programming," *Sensors*, vol. 21, no. 5, p. 1696, 2021.

[15] Y.-a. Gao and Q.-s. Yang, "A theoretical treatment of crowd-structure interaction," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 18, no. 1, Article ID 1871001, 2018.

[16] Whittington, Ben R., and Darryl G. Thelen. "A simple mass-spring model with roller feet can induce the ground reactions observed in human walking." Journal of Biomechanical Engineering 131.1 (2009).

[17] QIN, J. W., et al. Pedestrian–bridge dynamic interaction, including human participation. Journal of Sound and Vibration, 2013, vol. 332, no 4, pp. 1107-1124.

[18] PFEIL, Michèle Schubert; VARELA, Wendell Diniz; DA COSTA, Natasha de Paula Amador. Experimental calibration of a one degree of freedom biodynamic model to simulate human walking-structure interaction. *Engineering Structures*, 2022, vol. 262, p. 114330

[19] Y.-a. Gao and Q.-s. Yang, "A theoretical treatment of crowd-structure interaction," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 18, no. 1, Article ID 1871001, 2018.

[20] Q. Yang and Y. Gao, "A theory treatment of pedestrian-induced lateral vibration of structure," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 140, 2018.

[21] H. Liang, Z. Zhang, and P. Wei, "Theoretical derivation and parameters analysis of a human-structure interaction system with the bipedal walking model," *Journal of Mathematics*, vol. 2021, Article ID 6683083, 28 pages, 2021.

[22] GAO, Yan-An; YANG, Qing-Shan; DONG, Yun. A three-dimensional pedestrian–structure interaction model for general

applications. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2018, vol. 18, no 09, p. 1850107.

[23] XIANG, Yujiang; ARORA, Jasbir S.; ABDEL-MALEK, Karim. Physics-based modeling and simulation of human walking: a review of optimization-based and other approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, vol. 42, no 1, p. 1-23.

[24] S. Kajita *et al*., "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, 2003, pp. 1620-1626 vol.2, doi: 10.1109/ROBOT.2003.1241826.

[25] Collins S, Ruina A, Tedrake R, Wisse M. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. Science. 2005 Feb 18;307(5712):1082-5.

[26] Collins SH, Adamczyk PG, Kuo AD. Dynamic arm swinging in human walking. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2009 Oct 22;276(1673):3679-88.

[27] ANDERSON, Frank C.; PANDY, Marcus G. Dynamic optimization of human walking. *J. Biomech. Eng.*, 2001, vol. 123, no 5, p. 381-390.

[28] D. Tlalolini, C. Chevallereau and Y. Aoustin, "Human-Like Walking: Optimal Motion of a Bipedal Robot With Toe-Rotation Motion," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 2, pp. 310-320, April 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2042458.

[29] De Leva P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. Journal of biomechanics. 1996 Sep 1;29(9):1223-30.

[30] Racic V, Pavic A, Brownjohn JM. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. Journal of Sound and Vibration. 2009 Sep 25;326(1-2):1-49.

[31] Ralston HJ. Energetics of human walking. InNeural control of locomotion 1976 (pp. 77-98). Springer, Boston, MA.

[32] Winter DA. Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley & Sons; 2009 Oct 12.

[33] Panero J., Zelinik M.. “Human Dimension and Interior Space. "A Source Book of Design Reference Standards." 1979.

[34] Geyer, Hartmut, Andre Seyfarth, and Reinhard Blickhan. "Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running." Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 273.1603 2861-2867. 2006.

Study on technologies implemented in the area of mental health for older adults Post-COVID-19

Estudio sobre tecnologías implementadas en el área de salud mental a adultos mayores Post-COVID-19

Nila Navarro
Maestría en Ciencias en Computación Móvil
Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales
Panamá, Panamá
nila.navarro@utp.ac.pa

Denis Cedeno-Moreno
Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales
Grupo de Investigación en Salud Electrónica y Supercomputación
Panamá, Panamá
denis.cedeno@utp.ac.pa

***Abstract*— Mental health has many alterations that are known as mental illnesses or disorders, which affect affective and cognitive processes, mood, thinking and behavior of human beings. Many people suffer from mental health conditions on some occasions. On the other hand, it becomes a mental illness when the symptoms and signs remain, causing stress in the individual, preventing him/her from developing in a natural way. Because of this, this paper proposes an analysis of different information and communication technology (ICT) architectures developed around mental health with the purpose of facilitating the greatest possible help.**

Keywords—mobile applications, mental disordes, cloud computing, mobile health, wearable technologies.

***Resumen* — La salud mental tiene muchas alteraciones que se conocen como enfermedades o trastornos mentales, que afectan los procesos afectivos y cognitivos, el estado de ánimo, el pensamiento y el comportamiento de los seres humanos. Muchas personas sufren afecciones de salud mental en algunas ocasiones. En cambio, se convierte en enfermedad mental cuando los síntomas y signos permanecen, provocando estrés en el individuo, impidiendo que se desenvuelva de forma natural. Debido a esto, se plantea en este trabajo un análisis de distintas arquitecturas de tecnologías de información y comunicación (TIC) desarrolladas en torno a la salud mental con el propósito de facilitar la mayor ayuda posible.**

Palabras claves— aplicaciones móviles, trastornos mentales, computación en la nube, salud móvil, tecnologías vestibles.

I. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS); señala que "La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades". De manera que, salud no es solamente la ausencia de una enfermedad, sino, es el resultado de un complejo proceso donde interactúan factores biológicos, económicos, sociales, políticos y ambientales en la generación de las condiciones que permiten el desarrollo pleno de las capacidades y potencialidades humanas, entendiendo al hombre como un ser individual y social [1].

La salud mental puede afectar a cualquier persona, independientemente de su religión, edad, género o situación económica. Pero ciertos grupos específicos se han visto más afectados que otros a lo largo de los años, siendo esto preocupante y consideramos que esta problemática debe abordarse adecuadamente como un problema. Actualmente, hay más incidencia en infantes, adolescentes, jóvenes, mujeres y adultos mayores y algunos con problemas de salud preexistentes [2].

Debido a lo que vivimos actualmente ocasionado por la pandemia de la COVID-19, la salud mental de la población general y de ciertos grupos poblacionales vulnerables como adultos mayores, se ha afectado de forma prominente [3]. Esta crisis impacta la actividad social, las interacciones y los comportamientos en múltiples niveles, emocionalmente, las actividades de distanciamiento social y autoaislamiento pueden causar problemas de salud mental como ansiedad y miedo o ira [4]. Tal es el caso que en Panamá, entre los 5 y 15 años, la carga de los trastornos de conducta (22%), dolores de cabeza (18%) incluyendo migraña y tipo tensional y los trastornos de ansiedad (14%), ganan importancia [5].

Con todos estos problemas surge la oportunidad de utilizar las TIC's como medio de apoyo para la generación de soluciones informáticas para mejorar la toma de decisiones de las unidades sanitarias del país. La utilización de tecnologías como Internet de las Cosas (IoT), Machine Learning (ML) y computación en la nube podría dotar a la población de herramientas básicas de control, cuidado y prevención sobre enfermedades. A su vez, el empleo de aplicaciones móviles de fácil acceso y usabilidad dedicadas a la salud (mHealth) posibilita desarrollar un aspecto preventivo de la salud en la sociedad que reduciría costos sanitarios [6]. Además, entre los posibles beneficios que se pueden obtener del uso de las mHealth, se encuentra el concepto de empoderamiento [7].

Actualmente, el 58% de los países miembros de la OMS han adoptado estrategias relacionadas con la mHealth. Según la encuesta realizada por dicha organización en el año 2015 [8]. Según un reporte del Institute for Healthcare Informatics, se encuentran disponibles alrededor de 165,000 aplicaciones mHealth para descarga en dispositivos Android e IPhone [9]. Los posibles usos de una aplicación mHealth en salud mental incluyen psicoeducación o

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00037

recomendaciones acerca de determinados trastornos o problemas, técnicas o ejercicios en forma de autoayuda o la posibilidad de interactuar con profesionales de la salud mental en tiempo real [10].

Nuestro estudio está centrado en pacientes adultos mayores con afecciones posteriores al COVID-19 (post-COVID-19) ya que, hasta el momento, existen pocos estudios sobre las posibles secuelas de la COVID-19 especialmente en la salud mental o problemas psicológicos derivados de esta enfermedad.

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis de los estudios donde se han implementado herramientas tecnológicas propuestas por diferentes investigadores alrededor del mundo para contener los efectos causados por la pandemia de la Covid-19. También presentamos la propuesta de una arquitectura basada en TIC que permita extraer datos de un sensor, realizar un análisis de esos datos y realizar recomendaciones a pacientes con episodios de ansiedad, basado en la utilización de componentes como ML, IoT y tecnología móvil para el manejo de afecciones psicológicas.

II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio nos basamos en el enfoque metodológico propuesto por Bárbara Kitchenham y otros [11], [12], donde la principal estrategia fue la búsqueda y selección de estudios primarios en bases de datos de científicas a través del uso de palabras claves, posterior se analizó la información de los estudios encontrados para luego establecer las áreas en las que estas tecnologías se ven mayormente empleadas en el contexto de salud mental. En la Fig.1 se muestra un esquema de la metodología seguida.

Fig. 1. Metodología para el desarrollo del estudio

A. *Fuente de datos*

Se realizaron búsquedas en las siguientes bases de datos: Google Scholar, Scielo, Digital Bibliography & Library Project (DBLP), IEEE Explore, Science Direct, Springerlink y Association for Computing Machinery (ACM). En la Fig.2 se muestra el porcentaje de artículos extraídos en la búsqueda realizada.

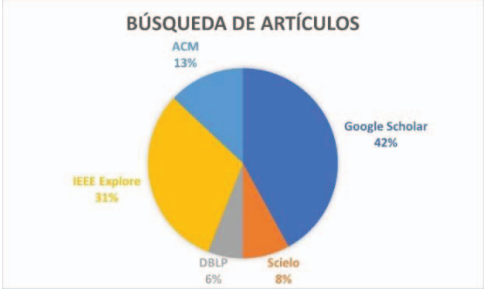


Fig. 2.Representación de la búsqueda de artículos

B. *Cadena de búsqueda*

Para realizar la búsqueda de aquellos artículos guardan mayor relación con nuestra área de estudio, hicimos uso de las siguientes combinaciones de palabras claves, las cuales están detalladas en la tabla I.

Tabla I:Estrategia de búsqueda

"Covid-19 AND salud", "Covid-19 AND mentalhealth", Covid-19 AND Healthcare", "Covid-19 AND Health", "Covid-19 AND impact", "Covid-19 AND secuelas".

III. RESULTADOS

Luego de realizar la búsqueda y estudio de los proyectos encontrados, establecimos aquellas tecnologías que se destacan en la actualidad debido a su enfoque y novedad dentro del área de salud mental, por lo cual a continuación mencionamos aquellos estudios que se han destacado dentro del contexto mencionado anteriormente.

A. *Inteligencia Artificial*

En el estudio [13], se realizó una investigación la cual se basó en aplicar varios algoritmos de ML para clasificación, como máquinas de vectores de soporte (SVM), Árboles de decisión (RF), Naïve Bayes (NB), Vecino más cercano (KNN) y regresión logística (LR) para identificar el estado de salud mental en un grupo objetivo. Las respuestas obtenidas del grupo objetivo para el cuestionario diseñado se sometieron primero a técnicas de aprendizaje no supervisado. Las etiquetas obtenidas como resultado de la agrupación se validaron mediante el cálculo de la puntuación media de opinión. Proporciona una comprensión intuitiva del análisis de la salud mental entre diferentes grupos objetivo. Desarrollaron un marco para determinar el estado de salud mental de un individuo. Este marco se utilizó para construir modelos de predicción. Antes de construir modelos, se utilizaron algoritmos de agrupamiento para identificar el número de agrupaciones. Las etiquetas de clase obtenidas se validaron mediante Puntuación media de la opinión (MOS), las cuales se dieron como entradas para entrenar al clasificador. Los experimentos han demostrado que los clasificadores SVM, KNN, RF se han desempeñado casi de manera equivalente. También se encontró que el uso de clasificadores de conjunto mejoró significativamente el rendimiento de la predicción de salud mental con un 90% de precisión. Este trabajo se puede ampliar para incluir diferentes sectores de la sociedad y también categorizar diferentes enfermedades mentales como ansiedad, depresión, etc. El uso de parámetros fisiológicos como el electrocardiograma (ECG) y la frecuencia respiratoria también podrían incluirse como características para predecir el estado mental de un individuo de manera más adecuada.

Por otra parte, en la investigación [14] los autores proponen un sistema experto de diagnóstico de salud mental (MeHDES) para ayudar a la psicología de Malasia en el diagnóstico y tratamiento de sus pacientes mentales, y también para permitir que cada paciente mental tenga varias opciones en seleccionar un plan de tratamiento que se ajuste a su presupuesto sin poner en peligro sus condiciones generales de salud. MeHDES se desarrolló

utilizando tres técnicas de razonamiento de inteligencia artificial (IA): razonamiento basado en reglas, lógica difusa y algoritmo genético difuso (borroso-GA). El uso de razonamiento basado en reglas, lógica difusa y algoritmo genético difuso (fuzzy-GA) en el sistema experto de diagnóstico en salud mental (MeHDES) es apropiado y útil para facilitar las funciones principales del sistema. El razonamiento basado en reglas permite a MeHDES imitar el razonamiento de un experto. Razonamiento al diagnosticar y llegar a la conclusión; mientras que la lógica difusa permite a MeHDES mejorar la conclusión para que sea más precisa cuando se trata de términos indefinidos como el nivel de gravedad de una condición mental. Con eso, MeHDES no solo está contribuyendo a los psicoterapeutas en Malasia, sino que también contribuye económicamente al público de Malasia.

Así mismo, los autores en [15] analizan el desarrollo de una aplicación web de terapia social en línea moderada (MOST), que proporciona una plataforma interactiva basada en redes sociales para la recuperación de la salud mental. La creación de contenido de terapia en los sitios MOST fue impulsada por los comentarios de los usuarios y médicos expertos en salud mental juvenil a través de prototipos iterativos y diseño participativo. El innovador sistema MOST, que integra el apoyo de pares en línea y las intervenciones basadas en la evidencia con un proceso único de prestación de servicios centrado en el médico y el consumidor, hasta ahora ha demostrado su viabilidad en una serie de ensayos de investigación, dadas las oportunidades basadas en datos que ofrece el sistema. Para implementarlo a mayor escala, un próximo paso importante en su evolución es la incorporación de métodos avanzados de IA. Esta innovación desempeñará un papel central en la promoción de los objetivos fundamentales de las intervenciones, como mejorar la participación del usuario, facilitar el descubrimiento y la entrega de contenido de terapia personalizado y promover la autonomía, la competencia y la relación. También servirá para suplementar, complementar o posiblemente incluso reemplazar a los moderadores humanos. En última instancia, este esfuerzo conducirá a un sistema más escalable que está mejor posicionado para satisfacer las necesidades no satisfechas en la provisión de salud mental a gran escala y el apoyo a largo plazo.

B. Computacion en la nube (cloud computing)

En su estudio [16], los autores analizan el estado actual de la salud mental de los niños migrantes urbanos con base en modelos de algoritmos de computación en la nube y minería de datos (MD). Se realizó una encuesta a estudiantes de secundaria y preparatoria en una ciudad determinada a través de cuestionarios, luego se construyó un modelo de algoritmo de MD para analizar los datos de la encuesta y explorar las diferencias en los grados de identidad social de los estudiantes y las diferencias en salud mental entre niños migrantes y niños urbanos. Según la encuesta, la mayoría de los desempeños psicológicos de los niños migrantes urbanos son muy vagos. Al mismo tiempo, también existen algunos fenómenos como la poca adaptabilidad, el mal humor y el complejo de inferioridad. Durante el periodo de estudio, hay situaciones como falta de voluntad para comunicarse con los demás, cansancio, sensibilidad, ansiedad y hostilidad. La incidencia general de la situación es relativamente alta en las grandes ciudades, mientras que la situación de los niños urbanos es relativamente pequeña.

En Taiwán, en un estudio [17], los autores proponen dos sistemas en el marco del Ubiquitous Healthcare System (UHS), que incluyen el servicio de administración remota de usuarios basado en la web (WURMS) y los servicios de computación interactivos multimodales (MICS). Los sistemas propuestos están coordinando un par de técnicas audiovisuales y de comunicación existentes, incluido el reconocimiento de voz/sonido, la identificación del hablante, la identificación de rostros, la estimación de la fuente de sonido, el texto a voz (TTS) y el reconocimiento de eventos. Para interfaces amigables para los adultos mayores. WURMS permite al usuario administrar el servicio de mensajes instantáneos de forma remota y establecer la conexión con el centro de servicios de atención médica para asistencia de emergencia. MICS proporciona los servicios multimodales interactivos de múltiples sensores en la casa y responde los resultados procesados para la solicitud interactiva. Mediante el uso de una red de información en la nube, MICS es capaz de proporcionar múltiples servicios interactivos y multimodales, incluida la recepción, el análisis y la respuesta de la señal audiovisual con la determinación de los modos correspondientes.

C. Salud móvil (mHealth)

En la investigación [18], los autores examinan la escalabilidad potencial y la eficacia de una aplicación de mHealth con funciones de salud conductual integradas para capturar la medición remota informada por el paciente de la ideación suicida y los síntomas generales de depresión y ansiedad. Todas las mediciones se almacenaron de forma segura en una base de datos compatible con la Ley de Portabilidad y Responsabilidad del Seguro Médico (HIPAA). En la plataforma, un médico solo accede a la información de sus pacientes a través de un tablero digital que se integra con el registro médico electrónico (EMR). El sistema de informes en la plataforma mHealth alerta a los médicos sobre pacientes que no están progresando o que tienen una salud conductual en declive. Las características de la aplicación móvil incluyen escalas diarias de autoevaluación para el estrés, el estado de ánimo, el sueño y el dolor; herramientas de atención plena, educación general para la salud y seguimiento de pasos. La plataforma mHealth está alineada con el modelo de recuperación mediante el uso de rastreadores y contenido de bienestar y también siendo complementaria a la atención psiquiátrica.

En un estudio desarrollado [19], se especifica que la tecnología móvil se utiliza cada vez más para mejorar la salud y el bienestar, incluso en la evaluación y el tratamiento de trastornos psiquiátricos. Dichas aplicaciones se han denominado colectivamente como mHealth este estudio proporciona una revisión integral y una perspectiva clínica de la investigación sobre mHealth en los trastornos del estado de ánimo y de ansiedad en la vejez. La novedosa recopilación de datos que ofrece mHealth ha contribuido a una comprensión más amplia de la psicopatología, a una

mayor diversidad de intervenciones psicológicas y a métodos novedosos de evaluación que, en última instancia, pueden brindar atención de salud mental adaptada individualmente para esta población. Los adultos mayores enfrentan desafíos como la movilidad o atención que limitan su capacidad para recibir servicios de atención médica y de salud mental, y la salud móvil puede mejorar la capacidad para llegar a esta población.

Aunque existen varias aplicaciones móviles para problemas relacionados con la salud en adultos mayores como el equilibrio, diabetes, control de medicamentos, son muy escasas las que se enfocan en los trastornos psiquiátricos.

D. Tecnologias vestibles (Wearable Technologies)

En su proyecto, Vidal et al. [20], proponen el seguimiento ocular portátil como un nuevo método para el seguimiento de la salud mental. Los dispositivos de sensores que se llevan en el cuerpo permiten el control de la salud y la recopilación de datos contextuales en la vida cotidiana y se están convirtiendo en un facilitador clave para los sistemas de salud generalizados. Si bien se han logrado avances considerables en la detección portátil y el análisis de datos en tiempo real, los sistemas actuales de monitoreo de la salud están limitados en términos de las enfermedades que pueden detectar. En particular, el inicio y la evolución de los trastornos psicológicos y cognitivos, como el Alzheimer, el Parkinson o la esclerosis múltiple, son difíciles de detectar utilizando modalidades de sensores comunes. Estos desafíos incluyen la portabilidad, el análisis de datos en tiempo real y el tiempo de funcionamiento.

Por otro lado Debart, en [21] proponen el proyecto Carewear que tiene como objetivo desarrollar y evaluar una plataforma en línea que permita a los profesionales de la salud utilizar datos de dispositivos portátiles en su práctica clínica. Carewear implementa la recopilación de datos a través del auto seguimiento, que tiene como objetivo ayudar a las personas en su proceso de cambio de comportamiento, como un componente de una intervención o terapia más amplia guiada por un profesional de la salud mental. Los dispositivos portátiles Empática E4 se utilizan para recopilar datos del acelerómetro, actividad electrodérmica (EDA) y pulso de volumen sanguíneo (BVP) en la vida real.

En la tabla 1 presentamos un compendio de los trabajos relacionados estudiados.

Tabla II: Trabajos relacionados

Trabajo			
	Autor	***Técnica***	***Uso***
11	Srividya	IA	Salud Mental a grupo objetivo
12	Masri	Técnicas de Razonamiento	Salud Mental de la población de Malasia
13	D'Alfonso	IA	Terapia de salud mental
14	Li	Minería de Datos	Salud mental de niños migrantes
15	Ou	Sistemas ubicuos	Salud mental de adultos mayores
16	Pardes	Plataforma mHealth	Atención psiquiátrica
17	Grossman	Plataforma mHealth	Salud mental de adultos mayores
18	Vidal	Sensor ocular portátil	Salud mental en general
19	Debard	Dispositivo Empática E4	Salud mental en general

El análisis de los diferentes trabajos presentados anteriormente muestra que la utilización de herramientas TIC's en la ayuda a pacientes es de gran importancia para las organizaciones de salud, también se han desarrollado varias soluciones en el área de salud mental lo que conlleva a diversos beneficios en la detección y control de problemas psicológicos.

En nuestro país contamos con muy pocos trabajos o investigaciones que ayuden a pacientes de afecciones psicológicas lo que nuestra propuesta implica un aporte a la comunidad panameña que padece estos problemas.

IV. ARQUITECTURA PROPUESTA

Luego de revisar la literatura y de identificar el impacto social y emocional que ha ocasionado la pandemia de la COVID-19 en nuestra población, surge la idea de proponer una arquitectura cuyos componentes tecnológicos nos permitirán ser medio de apoyo al impacto de la salud mental de los habitantes afectados.

Nuestra propuesta se enfoca en el diseño y desarrollo de una arquitectura compuesta por distintas capas, lo cual se observa a través de la Fig 3.

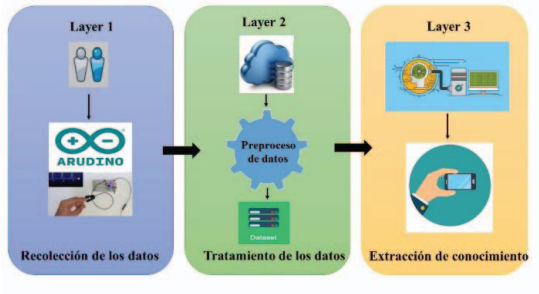


Fig. 3. Arquitectura propuesta

A continuación, detallamos cada una de las capas en las que está compuesta la arquitectura:

Layer 1 - Recolección de los datos: Esta capa realizar el desarrollo de un sensor de bajo costo, el cual permite monitorear el nivel de ansiedad del paciente por medio de la medida del ritmo cardíaco y a su vez será el medio para la creación de nuestro conjunto de datos. El sensor está compuesto por:

1) Pulsómetro: Es el componente o sensor que nos permitirá captar las pulsaciones emitidas.

2) Placa Arduino Uno: Funcionará como un microcontrolador.

3) Módulo adaptador LCD a I2C: Permite la visualización de los datos emitidos por el sensor.

4) Diodo Led: Sirve para determinar cuando empieza la lectura de los datos.

5) Protoboard 830: Lo utilizamos para realizar las conexiones de los diferentes actuadores y sensores a la placa.

6) Módulo Wifi ESP8266: *Es el m*edio de comunicación para enviar los datos hacia *el repositorio que esta en* la nube.

La integración de estos componentes nos dará como resultado un sensor de bajo costo tal y como se muestra en la Fig.4 cuyo funcionamiento es que el individuo coloque su dedo índice sobre el sensor con el diodo led podremos saber las pulsaciones por minuto y a través de la LCD observar la medición.

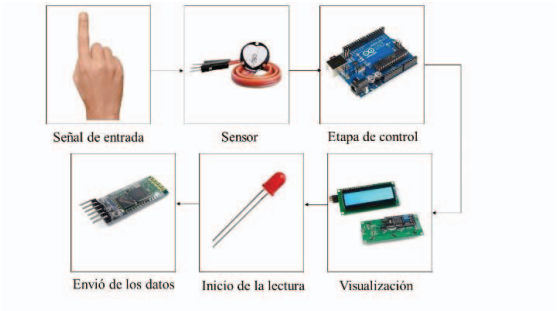


Fig. 4. Funcionamiento del sensor

Layer 2 – Tratamiento de los datos: En esta capa recibimos de la capa anterior los datos del paciente y se realizan una serie de subetapas que detallamos a continuación:

1) Almacenamiento de los datos: Los datos emitidos por el sensor serán enviados a traves de un componente WIFI por medio del módulo ESP8266. Estos datos cuales seran alojados en un repositorio en la nube, debido a que esta modalidad tiene la particularidad de permitirnos acceder en cualquier momento y en cualquier lugar a ellos, por lo que es ideal en múltiples ocasiones donde puede ocurrir algún fallo en el censado. Combinando, las soluciones de IoT y la nube, apoyamos a que la lectura y captura de datos se realice en tiempo real.

2) Técnicas de Preprocesamiento: El preprocesamiento de datos es un paso importante durante el proceso de analizar los datos. Se trata de diferentes tipos de procesos que se realizan con los datos en crudo para transformarlos en datos que tengan formatos que sean más fáciles de utilizar. En el mundo real, los datos frecuentemente no están limpios, faltan valores claves, contienen inconsistencias y suelen mostrar ruido, conteniendo errores y valores atípicos. Sin un adecuado preprocesamiento de datos, estos errores en los datos sobrevivirían y disminuirían la calidad del modelo que se quiere desarrollar.

3) Generación de un dataset*:* Luego de obtener un conjunto de datos lo suficientemente estable y normalizado, se pretende generar un dataset que no es más que un conjunto de datos tabulados en cualquier sistema de almacenamiento de datos estructurados. En donde hacemos referencia a una única fuente de datos de origen, la cual se puede relacionar con otras, cada columna del dataset representa una variable y cada fila corresponde a cualquier dato que estemos tratando.

Layer 3 - Extracción del conocimiento: Esta capa de la arquitectura es la que realiza la parte del análisis. Donde tenemos las siguientes subcapas:

1) Implementar técnicas de ML: Al dataset se le aplicarán técnicas de ML especificamente algoritmos de clasificación, lo cual nos permitirá entrenar un modelo que nos permita analizar el conjunto de datos para establecer aquellas recomendaciones que son de beneficio a los pacientes. En cuanto a la programación del modelo de ML será a través del lenguaje de programación Python, debido a que la legibilidad del código desarrollado en él es sencillo, elegante y busca ser consistente. Utilizaremos un entorno de desarrollo (IDE) Júpiter el cual se ejecuta en local como una aplicación cliente-servidor y posibilita tanto la ejecución de código como la escritura de texto, favoreciendo así la interactividad del entorno y que se pueda entender el código como la lectura de un documento como también la implementación de la libreria de Scikit-Learn llamada Selectkbest la cual nos permite determinar cuáles son las características que están más relacionadas.

2) Sistema de Recomendación: El propósito es el desarrollo de una aplicación movil a la que hemos llamado APPRelax es un software donde el usuario pueda visualizar recomendaciones o alternativas no farmacológicas cuando esté experimentando un ritmo cardiaco anómalo. Precisamente al implementar el sensor descrito anteriormente podremos determinar el ritmo cardiaco estable y de esta manera poder sugerir a traves de APPRelax actividades como: ejercicios de respiración, E-books, yoga, entre otras, para brindar apoyo a ese sector de la población.

APPRelax se está desarrollando en un inicio en el sistema operativo Android que está basado en otros lenguajes como: Java y C++, puesto que actualmente en Panamá, el 86% de las personas con Smartphones utilizan Android y un 13% se decanta por el sistema iOS y el 1% restante opta por otras alternativas [22]. El patrón de arquitectónico para el desarrollo de APPRelax está basado en el Modelo-Vista-Controlador (MVC) el cual es un patrón de diseño de software que separa los datos de una aplicación, la interfaz de usuario, y la lógica de control en tres componentes distintos, de forma que las modificaciones al componente de la vista, o a cualquier parte del sistema puedan ser hechas con un mínimo impacto en el componente del modelo de datos o en los otros componentes del sistema. Este patrón cumple perfectamente el cometido de modularizar un sistema de software [23]. En la Fig.5 podemos apreciar la pantalla

principal de la APPRelax donde podemos apreciar el menú principal.

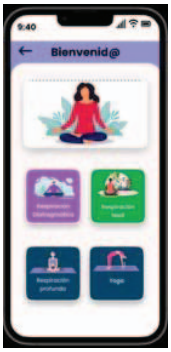


Fig. 5. Pantalla principal de la APPRelax

V. CONCLUSIONES

La salud mental es importante en todas las etapas de la vida, desde la niñez, la adolescencia hasta la adultez y la vejez. La salud mental de nuestros adultos mayores incluye su bienestar emocional, psicológico y social. También ayuda a determinar cómo ellos manejan el estrés, la forma en la que se relacionan con los demás y toman decisiones.

Resulta desafiante incursionar en esta área, puesto que primero se debe entender la condición para tratar de proponer una alternativa que sea fiable y a su vez resulte de beneficio a este sector de la población que se ve afectada por trastornos de salud mental post-COVID-19 y es allí donde la tecnología juega un papel muy importante debido a que permite que las personas sean independientes.

Durante este periodo de aislamiento es posible que las personas se sientan incómodas por tener que atender visitas en persona con sus terapistas u otros profesionales de la salud mental. Una opción es aprovechar los avances tecnológicos y proponer alternativas que sean de beneficio.

Este estudio contribuye a que a través de sensores (IoT), recolectemos datos de pacientes adultos mayores, recolectemos y procesemos estos datos y a través de técnicas de ML podamos recomendar usando una aplicación móvil (APPRelax) técnicas de mejora a su estado de miedo, ansiedad o ira.

AGRADECIMIENTOS

[N. Del C. N.] es apoyada por una beca del Programa de Fortalecimiento de los Postgrados Nacionales de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT-Panamá).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

[1] Organización Mundial de la Salud Ginebra, “Promoción de la salud Mental,” 2004.

[2] X. Goldberg, O. Ramirez, M. van den Bosch, L. Liutsko, and B. Briones, “¿Es la salud mental la pandemia después de la COVID-19?,” 2021, doi: 10.1016/S2215.

[3] J. Hernández, “Impacto de la COVID-19 sobre la salud mental de las personas,” *Medicentro Electrónica*, vol. 24, no. 3, pp. 578–594, 2020.

[4] J. W. Mcnally *et al.*, “ICPSR Working Paper 2: Best Practices for measuring the social, behavioral, and economic impact of epidemics.”

[5] Organización Panamericana de la Salud, “PANAMA.”

[6] J. García and A. Arredondo, “Aplicaciones móviles como herramientas en los servicios de salud,” 2017, Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/pdf/hs/v16n2/2007-7459-hs-16-02-00085.pdf.

[7] N. González and J. Ignacio Fernández Morales, “Communication, Health and Technology : the road to mHealth Sugerencias sobre como citar este artículo,” *Rev. Comun. y Salud*, vol. 5, pp. 144–153, 2015.

[8] world health organization, “Atlas of eHealth country profiles: the use of eHealth in support of universal health coverage,” 2015. https://www.who.int/publications/i/item/9789241565219 (accessed May 20, 2022).

[9] C. K. Rubanovich, D. C. Mohr, and S. M. Schueller, “Health App Use Among Individuals With Symptoms of Depression and Anxiety: A Survey Study With Thematic Coding,” *JMIR Ment. Heal.*, vol. 4, no. 2, Apr. 2017, doi: 10.2196/MENTAL.7603.

[10] M. Sucala, J. B. Schnur, K. Glazier, S. J. Miller, J. P. Green, and G. H. Montgomery, “Hypnosis: There’s an App for that. A systematic review of hypnosis apps,” *Int. J. Clin. Exp. Hypn.*, vol. 61, no. 4, p. 463, Oct. 2013, doi: 10.1080/00207144.2013.810482.

[11] B. T. Johnson, R. E. Low, and J. M. LaCroix, “Systematic Reviews to Support Evidence-based Medicine (2nd edition) by Khalid Khan, Regina Kunz, Jos Kleijnen and Gerd Antes: A Review,” *Res. Synth. Methods*, vol. 4, no. 1, pp. 102–108, 2013, doi: 10.1002/jrsm.1071.

[12] M. Petticrew and H. Roberts, “Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide,” *Syst. Rev. Soc. Sci. A Pract. Guid.*, pp. 1–336, Jan. 2008, doi: 10.1002/9780470754887.

[13] M. Srividya, S. Mohanavalli, and N. Bhalaji, “Behavioral Modeling for Mental Health using Machine Learning Algorithms,” *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 5, 2018, doi: 10.1007/s10916-018-0934-5.

[14] R. Y. Masri and H. Mat Jani, “Employing artificial intelligence techniques in Mental Health Diagnostic Expert System,” *2012 Int. Conf. Comput. Inf. Sci. ICCIS 2012 - A Conf. World Eng. Sci. Technol. Congr. ESTCON 2012 - Conf. Proc.*, vol. 1, pp. 495–499, 2012, doi: 10.1109/ICCISci.2012.6297296.

[15] S. D’Alfonso *et al.*, “Artificial intelligence-assisted online social therapy for youth mental health,” *Front. Psychol.*, vol. 8, no. JUN, pp. 1–13, 2017, doi: 10.3389/fpsyg.2017.00796.

[16] J. Li, “Analysis of the Mental Health of Urban Migrant Children Based on Cloud Computing and Data Mining Algorithm Models,” 2021, doi: 10.1155/2021/7615227.

[17] Y.-Y. Ou, P.-Y. Shih, Y.-H. Chin, T.-W. Kuan, J.-F. Wang, and S.-H. Shih, “Framework of Ubiquitous Healthcare System Based on Cloud Computing for Elderly Living.”

[18] A. Pardes, W. Lynch, M. Miclette, E. Mcgeoch, and B. P. Daly, “Research Article,” doi: 10.36401/IDDB-21-03.

[19] J. T. Grossman, M. R. Frumkin, T. L. Rodebaugh, and E. J. Lenze, “MHealth Assessment and Intervention of Depression and Anxiety in Older Adults,” *Harv. Rev. Psychiatry*, vol. 28, no. 3, pp. 203–214, 2020, doi: 10.1097/HRP.0000000000000255.

[20] M. Vidal, J. Turner, A. Bulling, and H. Gellersen, “Wearable eye tracking for mental health monitoring,” *Comput. Commun.*, vol. 35, no. 11, pp. 1306–1311, 2012, doi: 10.1016/j.comcom.2011.11.002.

[21] G. Debard, N. De Witte, R. Sels, M. Mertens, T. Van Daele, and B. Bonroy, “Making wearable technology available for mental healthcare through an online platform with stress detection algorithms: The CareWear project,” *J. Sensors*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8846077.

[22] Crisol FM, “Panamá, segundo país de Centroamérica con más penetración de internet - Crisol FM,” 2019.

https://sertv.gob.pa/crisolfm/panama-segundo-pais-de-centroamerica-con-mas-penetracion-de-internet/ (accessed Jul. 09, 2022).
[23] U. Alejandro de Humboldt, “MODELO VISTA-CONTROLADOR (MVC),” 2016.

Novel deployable landing system for UAV based on the tensegrity principle

Andres Gonzalez-Fallas
School of Electrical and Mechanical Engineering
Universidad Latina de Costa Rica
Heredia, Costa Rica
ricardo.gonzalez11@ulatina.net

***Abstract*— Unmanned aerial vehicles are a valuable tool for commercial and civil duties, representing an important market for the electronics industry. A common style of drone is the quadcopter, and most manufacturers present similar designs but with unique specifications. One characteristic that these designs have in common is the use of rigid landing structures that are unable to adapt to different environments. This paper proposes the use of the tensegrity principle for the design of a deployable landing system for quadcopters. The main concept behind this scheme is described and a CAE simulation is presented to verify the feasibility of the design.**

Keywords— drones, tensegrity, landing gear, deployable, UAV

I. INTRODUCTION

No matter if it is as toys, as military tools or for search and rescue operations, the market of unmanned aerial vehicles has seen a spike in the demand in the past decade. The variety of possible applications for these devices has required the constant development of new models with different capabilities. Drones that fit in the pocket, autonomous flying vehicles and drones that can carry and deliver packages are just some examples.

Amongst the commercial drones, the most common configuration is the quadcopter. The landing system of this vehicle consists of a solid component protruding downwards from under each one of the motors; these leg-like structures support the chassis and give it some ground clearance. Another design, mostly used by bigger drones with cameras mounted on the bottom, is based on the same system used by helicopters, with two horizontal bars that are in contact with the ground when landed.

Fig. 1. Three bar tensegrity unit

Although simple and economic, these designs have the disadvantage of being rigid even when they are not in use. For some applications, this is inconvenient since it expands the height of the drone, resulting in an increased possibility of crashing. It also affects the operation of instruments, such as cameras and robotic arms, by reducing the range of motion.

Tensegrity structures have been a hot topic for soft robotics in recent years thanks to their properties, such as light weight, structural stiffness and the possibility of applying control methods to change their shape. Complex systems such as space robots [8] or biomechanical applications [9] have been proposed. In recent years, tensegrities have also been described as a useful structural component for the design of drones, because of their ability to absorb impacts without deformation [10], and even a spheric tensegrity drone was proposed by students at the University of Berkeley [11]. However, besides these references, not much research has been done about the use of tensegrities for vehicle applications or tensegrities for drone landing systems.

In this paper, an innovative design for a collapsible landing system for unmanned aerial vehicles based on tensegrities is proposed. The main concept is first described, followed by a modelling of the system using CAE software. A simulation of the actuation process is run, and the figures show how the proposed system is able to collapse and deploy without interfering with the instruments attached to the drone.

II. MATERIALS AND METHODS

The landing system here proposed can be divided into two sections; the structural characteristics, and the accessories and electronics. The first one is not fully described here as there is vast literature corresponding to the topology of tensegrity structures.

A. Structural characteristics

From a structural point of view, tensegrities are systems composed of tensile and compressive elements, where the compressive components, usually bars, are not in contact with each other. The stability of the structure is given by the tension of the tensile elements and is related to the prestress level of these. A tensegrity unit is the basic component of any tensegrity system. In three dimensions, three is the lowest number of bars that results in a stable configuration, as seen in Figure 1.

The topology of tensegrity units has been extensively studied and a common approach is detailed by Skelton and De Oliveira [12]. In general, tensegrity units can be described as two sets of nodes, located on parallel planes, forming both sets the vertices of the same polygon; this results in a symmetric configuration. Should be noted that there is no restriction to weather the top and bottom radius of the unit should have the same value. These planes present a rotation around the axis normal to both, that can be calculated according to [12], and

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00038

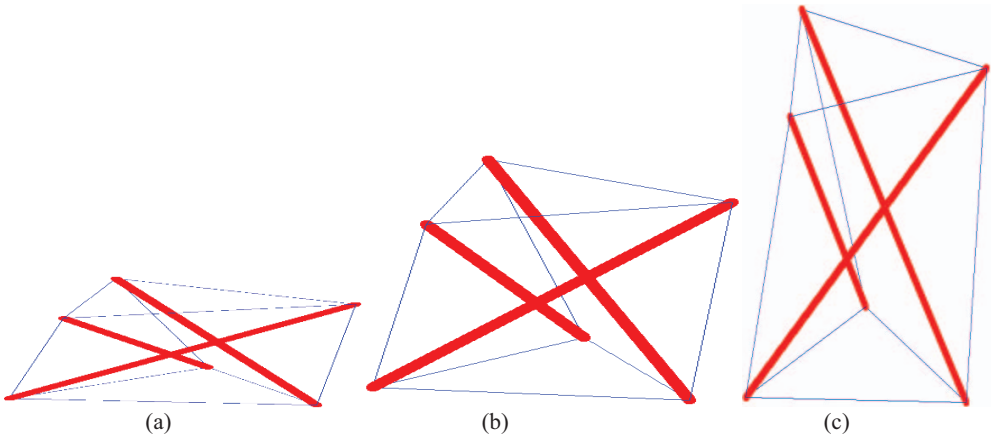


Fig. 2. Three stages of the deployment of a tensegrity unit. (a) Collapsed, (b) intermediate position, (c) deployed.

the bars connect a bottom node with the corresponding top node. The cables also link top and bottom nodes, as well as the nodes located on the same plane.

Although not every configuration of bars and cables results in a stable tensegrity geometry, it is possible to modify the dimension of some of the elements while assuring the stability of the system. If the vertical cables are selected as the control elements, and their variation is defined as symmetric, then the height of the tensegrity unit can be adjusted according to the requirements of the application. For example, the unit could be extended if a device is going to be attached to the drone, or lowered if no equipment is used; the tensegrity could also be assymetrically reconfigured, to adapt to an uneven terrain.

This deployment process is presented in Figure 2, where three four-bar tensegrity units with bars of identical length and top plane of the same size represent three steps of the reconfiguration of the same unit. The structure in Fig. 2a corresponds to the system in its minimum size, or totally collapsed, where the height is limited by the thickness of the bars, while Fig. 2c is the structure deployed to its operational size.

The maximum height to which the structure can be deployed is limited by a practical principle. Although it can be increased until a certain size where the tips of the bottom bars almost collide, this results in an unstable configuration, where the bottom polygon presents a smaller circumradius than the top polygon. To assure that the system tensegrity/drone is not going to tip over, the face in contact with the ground must be bigger than the top face connected to the drone.

B. *Other components*

For actuating the system, the vertical cables can be connected to DC motors that would release or retract the cables using a pulley. The motors can then be controlled using the computer of the drone to reduce the number of electronic systems and the actively actuated elements can be steel cables of a small caliber. If springs are used as passively actuated elements, replacing the bottom cables, the control system is simplified, as there is no need for the computer to calculate the required length of all the cables to result in a stable structure; once the vertical cables are shortened, the springs will automatically adjust their length. A similar design was presented by the author [13].

The diameter and material of the bars would depend on the availability and budget of the project, as well as on the size and weight of the drone's frame. Stronger, lighter materials would reduce the additional weight and requirement of batteries with higher capacity. Ball joints should be used to attach the bars to the frame, so no torque is induced on the bars or the frame, allowing these to rotate freely during the reconfiguration. Components such as pulleys or motor supports could be 3D printed using commercial materials.

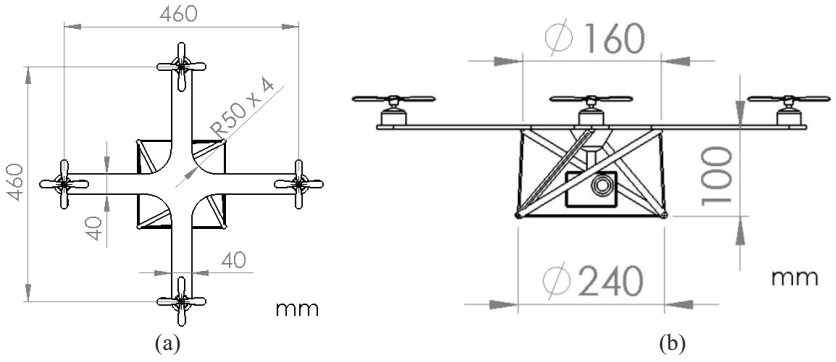
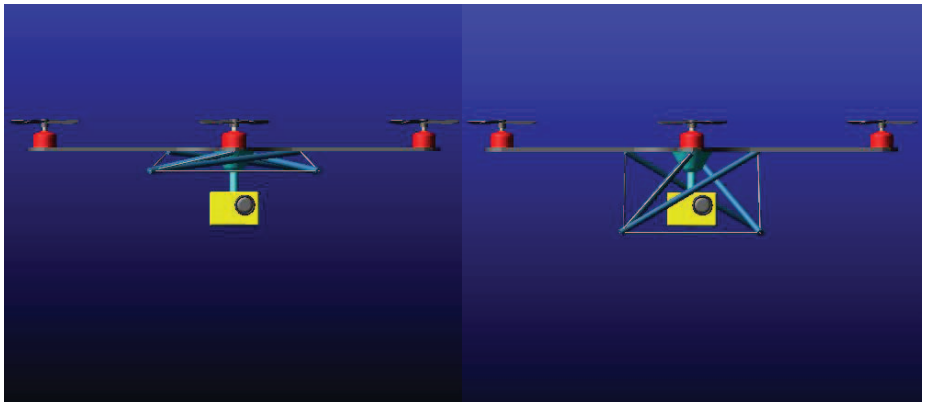


Fig. 3. Dimensions of drone chassis. (a) Top view, (b) side view



(a) (b)

Fig. 4. Landing system in motion. (a) Collapsed, (b) deployed.

III. Results

A quadcopter unmanned aerial vehicle was simulated using a multiphysics engineering software, where the typical rigid fixed legs that most quadcopter-style drones present were replaced with a four-bar tensegrity structure, as shown in Figure 3. The dimensions of the chassis are similar to the commercially available devices and are also illustrated in Figure 3. The motors and rotors, as well as a video camera, were included in the modeling to add some perspective but also to verify the feasibility of the model; it should be noted that the electronics and other components of a real aerial drone were omitted for simplification purposes because the focus of this paper is the landing system.

The tensegrity system is designed as a truncated cone, with a top diameter of 160 mm and a bottom diameter of 240 mm; this geometry increases the stability by reducing the risk of the drone flipping over during landing. A height of the structure of 100 mm is defined and is considered high enough to cover the camera located at its interior, but small enough to reduce the weight of the structure as much as possible. Although the smallest stable tensegrity structure is composed of only three compressive elements, a four-bar unit is selected in this model for maintaining the original four-point contact with the ground while increasing the free space inside the tensegrity. The upper nodes of the tensegrity are assumed to be fixed to the drone body using joint balls to allow free rotation of the bars.

For this model, the bars have a diameter of 8 mm, and the vertical tensile elements are cables; in a real model, these would be actuated using DC motors located on the chassis, next to the ball joint of each bar. The tensile elements connecting the bottom cables can be replaced by springs, as passively actuated elements. Materials are not defined for the simulation as they are not relevant for this step of the design process.

Besides being lightweight, tensegrity structures can also be used as deployable systems if some of its elements are actuated. Using this principle, the design considers the actuation of the vertical cables of the tensegrity. In this way, once the drone takes off, the landing system can be collapsed, to allow free use of the instrumentation on board (cameras, measurement equipment…) and it can be deployed again for landing. In this case, the tensegrity structure acts both as landing system as well as a protection structure for the equipment.

For this simulation of a standard landing/takeoff routine, the collapse and deployment of the tensegrity system follows a symmetric path, meaning that the four actuated cables will present the same elongation rate. A specific value of the elongation rate is not defined, as a complete collapse/deployment is desired; instead, a collision restriction amongst bars is setup in the software as the limit position for the collapse. This results in a packed height of just 23 mm, but it could be even lower if bars of a smaller diameter were used.

The results of the simulation can be observed from Figure 4, where it is shown how the tensegrity is able to collapse, Figure 3a, and deploy, Figure 3b, while giving free space for the instruments to be used. The simulation was also used to confirm that the inner space of the tensegrity unit with four bars is enough to accommodate the proposed equipment without any conflict such as collisions between components. The dimensions of the proposed tensegrity structure were defined for holding a specific model of camera, but a bigger structure could be used if bigger instruments are to be used.

IV. Discussion

A collapsible landing system for unmanned aerial vehicles (UAV) based on tensegrity structures has been proposed. The structural system is a four-bar tensegrity unit, with actuated vertical cables that allow the system to collapse and deploy as required. By means of CAE software, the efficacy of the mechanism was confirmed, and it was proved that equipment, such as a camera, can be located at the inside of the tensegrity without colliding.

The proposed design represents an improvement in the design of commercial UAVs, as a collapsing landing system reduces the height of the device during operation resulting in a lower risk of collision and a higher clearance for the operation of instruments or for carrying cargo. An additional advantage of this system is that it can be easily upgraded to accommodate bigger equipment, by replacing the bars with longer ones, and adjusting the control program. Future work includes the construction of a real model.

Acknowledgment

The financial support from the Universidad Latina de Costa Rica is deeply appreciated.

REFERENCES

[1] M. Magesh and P. K. Jawahar, "Examination of shape memory polymer-auxetic landing gears on landing approach for quadcopter," Materials Today: Proceedings, vol. 47, pp. 471-479, 2021/01/01/ 2021.

[2] M. Tieu, D. M. Michael, J. B. Pflueger, M. S. Sethi, K. N. Shimazu, T. M. Anthony, et al., "Demonstrations of bio-inspired perching landing gear for UAVs," in Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication 2016, 2016, p. 97970X.

[3] J. Choi, D. Cheon, and J. Lee, "Robust Landing Control of a Quadcopter on a Slanted Surface," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 22, pp. 1147-1156, 2021/06/01 2021.

[4] B. Stolz, T. Brödermann, E. Castiello, G. Englberger, D. Erne, J. Gasser, et al., "An Adaptive Landing Gear for Extending the Operational Range of Helicopters," in 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018, pp. 1757-1763.

[5] B. León, J. J. Rimoli, and C. V. Di Leo, "Ground and Flight Tests of an Unmanned Rotorcraft with Cable-Driven Robotic Landing Gear," Journal of the American Helicopter Society, vol. 66, pp. 1-10, 2021.

[6] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, "Innovative Design of Drone Landing Gear Used as a Receiving Coil in Wireless Charging Application," Energies, vol. 12, p. 3483, 2019.

[7] G. Yashin, A. Egorov, Z. Darush, N. Zherdev, and D. Tsetserukou, "LocoGear: Locomotion Analysis of Robotic Landing Gear for Multicopters," IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, vol. 1, pp. 138-147, 2020.

[8] A. P. Sabelhaus, J. Bruce, K. Caluwaerts, P. Manovi, R. F. Firoozi, S. Dobi, et al., "System Design and Locomotion of SUPERball, an Untethered Tensegrity Robot," in 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, 2015, pp. 2867-2873.

[9] A. González and A. Luo, "Design and Control of a Tensegrity-Based Robotic Joint," presented at the IFToMM World Congress, Krakow, 2019.

[10] B. Johnson and A. Agogino, "Feasibility Analysis of Unmanned Aerial Vehicle Based on Tensegrity Structure," NASA Ames Research Center, California, USA2021.

[11] J. Zha, X. Wu, J. Kroeger, N. Perez, and M. W. Mueller, "A collision-resilient aerial vehicle with icosahedron tensegrity structure," in 2020 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, 2020, pp. 1407-1412.

[12] R. E. Skelton and M. De Oliveira, Tensegrity Systems, 1 ed. US: Springer US, 2009.

[13] A. González, A. Luo, and D. Shi, "Reconfiguration method of tensegrity units using infinitesimal mechanisms," Engineering Computations, vol. 36, pp. 1934-1949, Jul 8 2019.

Prediction of "bad postures" based on Machine Learning models

Luis Fernando Gómez Mendoza
Universidad Nacional de Ingeniería
Grupo de Sensado Multidisciplinario
Lima, Perú
lgomezm@uni.pe
https://orcid.org/0000-0002-2727-8972

Sofía Huamán Vizconde
Universidad Nacional de Ingeniería
Grupo de Sensado Multidisciplinario
Lima, Perú
s.huaman@ieee.org
https://orcid.org/0000-0002-7865-1255

José Luis Castillo Sequera
Universidad de Alcalá
Departamento de Computer Science
Madrid, España
jluis.castillo@uah.es
https://orcid.org/0000-0002-9131-1618

Jimmy Aurelio Rosales Huamaní
Universidad Nacional de Ingeniería
Grupo de Sensado Multidisciplinario
Lima, Perú
jrosales@uni.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-3737-8694

***Abstract*—The advances of the Internet, mobile communications and computing have opened new frontiers for a society that is increasingly focused on data analysis. New applications increasingly rely on machine-to-machine communications, which in turn create workloads that demand innovative systems, as network devices, sensors, and intelligent systems now generate vast amounts of data that can be processed to solve everyday problems, there is no doubt that new technologies have made our lives easier. However, despite all the advantages they bring, they have also brought some discomfort to our health. Especially, behind our back, which can be harmful to the spine. For these reasons, the purpose of this work was to design and build a prototype system that "detects and corrects bad posture" of a person when performing their daily activities. To do this, we use a prediction system with the help of three inertial sensors. The developed device consists of a monitoring system that includes 3 risk posture factors and is capable of providing feedback, through an application that alerts the user in order to prevent poor posture or inadequate posture that can become chronic. , causing neck pain, back pain, etc. In this way, a message is sent in case the posture of the human subject is outside the established threshold. The experimental results carried out with various machine learning algorithms demonstrate the abilities of the system to distinguish an improper head posture from a correct one. Different algorithms were applied, finding that by applying Neural Networks Artificial (ANN) we obtain better results.**

Keywords— Machine Learning, Neural Networks Artificial, bad posture, neck text, prediction.

I. INTRODUCCION

Los dispositivos de red, los sensores, los sistemas inteligentes generan grandes cantidades de datos que pueden ser procesados para solucionar problemas cotidianos. La utilización de los móviles va más allá que la comunicación, cumpliendo otras funciones como entretenimiento, educación e incluso como sistema para captación y recopilación de datos aplicados a temas de salud. Debido a esto, cada vez más se desarrollan nuevos dispositivos con una gran variedad de sensores en el ámbito tecnológico de IoT, que hace posible la integración de éstos dispositivos con el interés de medir distancias, velocidad, aceleración, etc. La complejidad de estas nuevas herramientas, así como las innovaciones en inteligencia artificial, aprendizaje automático y análisis de datos posibilitan su aplicación a diversas áreas.

Por otro lado, según estudios recientes se demuestra que la inserción de las nuevas tecnologías en las escuelas y en la vida cotidiana ha ocasionado que el tiempo estimado en la utilización de ordenadores, móviles, tablets o algún otro dispositivo se incremente considerablemente. El síndrome "text neck" daña el aparato neuro-musculoesquelético y presenta un conjunto complejo de síntomas clínicos, dándose en diferentes pacientes con diferentes edades [1]. Se estima que el 75% de la población mundial se encorva sobre sus dispositivos móviles durante horas [2]. El aumento del estrés en la columna cervical puede conducir a la degeneración cervical junto con otras complicaciones del desarrollo, psicológicas, médicas y sociales. Estas tensiones pueden ocasionar también el desgate prematuro, roturas, degeneración y posibles cirugías al paciente [3]. Diversas investigaciones argumentan que un diagnóstico apropiado y tratamiento temprano es crucial para la evaluación adecuada de pacientes jóvenes, en niños y adolescentes [2].

Este trabajo presenta un sistema capaz de predecir la postura de una persona a partir de las medidas de aceleración de tres sensores inerciales MPU6050, los cuales sirven como fuente de datos para el entrenamiento y validación de modelos de Machine learning.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La utilización de los dispositivos electrónicos portátiles en la vida diaria ha traído muchos beneficios. Sin embargo, desde el 2008 se ha identificado una problemática en personas que pasan demasiado tiempo en estos dispositivos con una mala postura, a lo que se denominó síndrome "text neck" por el doctor Dean Fishman [4]. Este síndrome hace alusión a la lesión provocada por un estrés repetitivo y dolor sostenido, debido a una flexión cervical durante el uso prolongado de dispositivos móviles en personas de diferentes edades [5]. Este síndrome daña al aparato musculoesquelético y se asocia a otros males. Por otro lado, el cuestionario Berolo [6], revela que el dolor de cuello está altamente relacionado a la frecuencia de uso de un movíl, ya que una postura común mientras se usa el teléfono es inclinar la cabeza hacia abajo, puesto que el teléfono está sostenido por debajo de los hombros siendo ello la causa principal del dolor de cuello.

Se estima que 4 billones de la población mundial tienen acceso a un dispositivo móvil, siendo el tiempo estimado de uso entre 3 a 4 horas diarias [7]. En Suiza [8], se realizó un

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00039

seguimiento de 7125 personas de entre 20-24 años durante 5 años para testear la relación del uso del celular y su relación en desórdenes musculoesqueléticos, obteniéndose que el 23% de los hombres y el 43% de las mujeres presentaron dolor de cuello. En Perú, el Instituto Nacional de Rehabilitación (INR) sostiene que de las personas que usan de manera constante el ordenador con mala postura, el 14% sufre de dolores de cabeza y el 24% sufre de dolor de cuello. Además, una investigación realizada por la compañía de mercados GFK [9] estudió la prevalencia del dolor cervical crónico en la población adulta peruana, donde el 20.9% de 1244 sufren dolor cervical crónico con una prevalencia alta a medida que la edad aumenta.

Por último, el interés en el estudio del "text neck" ha aumentado dado que se considera una enfermedad relacionada con la tecnología y presenta un incremento anual sufrido a nivel mundial. Por la relevancia del tema, en este trabajo se plantea el desarrollo de un prototipo capaz de alertar la mala postura al utilizar dispositivos móviles de forma que pueda evitarse y de esta manera, ayudar a la mejora de la misma en los usuarios que padecen de este problema. Por lo tanto, se desarrolla un sistema discreto que utilizando información cuantitativa sobre los parámetros mencionados es útil para prevenir los efectos de posturas incorrectas prolongadas y posiciones inadecuadas en las personas. Por todo ello, el objetivo principal de este trabajo fue el de desarrollar un prototipo de predicción que permita detectar la mala postura de la cabeza basado en modelos de machine learning.

III. METODOLOGIA

Para abordar la metodología de la investigación, se toma en cuenta los diversos aspectos que están relacionados al "text neck", lo cual se detalla a continuación:

El término "text neck" se refiere a la condición ocasionada por el estrés repetitivo sobre el cuello, los autores Cuellar y Lanman [10] basándose en el estudio [11] demuestran mediante un estudio de elementos finitos que la carga que soporta la columna vertebral está fuertemente relacionada con la inclinación del cuello, es decir, si la inclinación del cuello aumenta entonces la carga que soporta la columna lo hará de manera proporcional. Como se puede observar en la figura 1 la carga normal que soporta la columna es de 10 a 12 libras (4.5 kg-5.4 kg) en la posición neutral, esto equivale a 49 N. Sin embargo, los autores mencionan que aumenta la fuerza hasta 264 N cuando se tiene una inclinación de cuello de 60°. Desde el punto de vista biomecánico, el síndrome text neck surge debido el exceso de tensión en la columna cervical debido a tareas motoras/posturales incorrectas ejercidas durante el uso del teléfonos móviles o dispositivos electrónicos [1]. Ocasionando una serie de síntomas que puede llevar desde el dolor de cabeza [12] hasta alteraciones o deformación del sistema musculoesquelético.

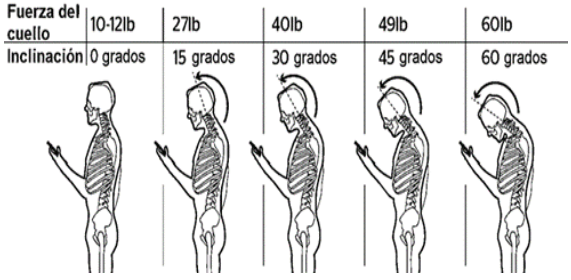


Fig. 1. Postura óptima (Norris, 1999)

En esta sección se procede a describir la metodología del artículo. Lo que incluye a la visión global del sistema de predicción de postura, las arquitecturas (hardware, software y comunicación), sustento anatómico y biomecánico, adquisición de datos, segmentación y etiquetado de datos, construcción de la interfaz, preparación de los datos y entrenamiento del modelo.

Los datos serán adquiridos por medio de 3 sensores inerciales conectado a la placa de desarrollo y luego se ejecutará el proceso de segmentación. Como siguiente paso se procederá al etiquetado de los datos y la elaboración del dataset de manera que se crea una estructura de datos con clases y atributos específicos para los archivos segmentados. Además, se procede a la extracción de características de los datos de manera que elimine los valores extremos y valores null, se normaliza los datos y numeriza en caso sea necesario (encoder). Por último, se aplica un procedimiento de k-fold para la partición de los datos de prueba y entrenamiento.

A. Arquitectura

Consta de las siguientes partes: arquitectura del hardware, arquitectura de comunicación y arquitectura del software.

1) Arquitectura del hardware: El sistema postural propuesto contiene una placa de desarrollo a nivel de prototipo, Arduino Uno, módulo bluetooth HC-06 y tres sensores MPU6050. En la figura 2, se muestra un esquema de conexión de los 3 acelerómetros; los cuales se ubican en la vértebra C4 y las articulaciones glenohumeral derecho e izquierdo (hombro derecho e izquierdo). El desarrollo de la placa consta del circuito de alimentación y funcionamiento para los sensores. Estos sensores se comunican con la placa del Arduino a través del módulo bluetooth HC-06. El sistema electrónico se empaqueta en una caja de dimensiones $15cmx10cmx10cm$, el cual incluye una correa para mantener el equipo sujeto al cuerpo. Debido a que el prototipo es portátil, fue necesario utilizar una batería de 9 voltios con un regulador de voltaje a 5 voltios, para energizar todos los componentes electrónicos. El hardware utiliza un computador como principal equipo donde se implementa los algoritmos en Python. Consta de una laptop Lenovo con procesador core i7, memoria de 8 GB de RAM. La selección de componentes y materiales se basó en trabajos relacionados [13]–[16].

2) Arquitectura de comunicaciones: La arquitectura de comunicaciones puede ser descrita como 2 subsistemas donde se comunican los componentes cumpliendo diferentes roles. El primero está compuesto por la comunicación entre el ordenador y el prototipo de la placa a través de la comunicación bluetooth. Siendo el ordenador la función de maestro de la comunicación, es decir, aquel que inicia y finaliza la comunicación con el Arduino. El segundo consiste en la comunicación de la placa con los sensores a través de la comunicación "Inter Integrated Circuits" (I^2C, por sus siglas en inglés). El Arduino cumple la función de maestro para la comunicación I^2C, es decir, se encarga de gestionar el inicio y fin de la comunicación con los 3 acelerómetros, tal como se muestra en la figura 3.

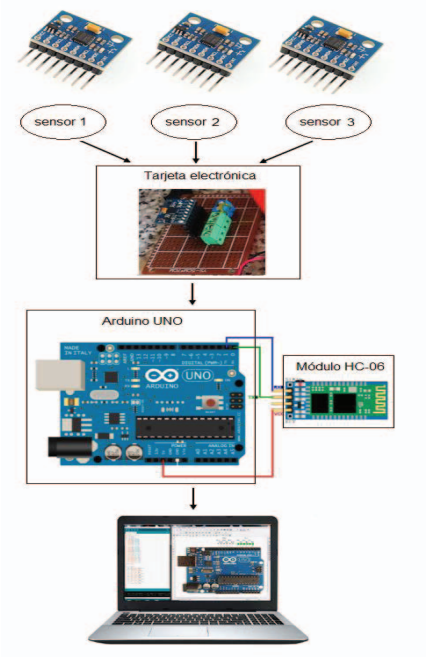


Fig. 2. Arquitectura del hardware

Fig. 3. Arquitectura de comunicación

3) Arquitectura del software: Esta arquitectura se describe en la figura 4, la cual incluye las etapas de preprocesamiento, entrenamiento y testeo del sistema propuesto.

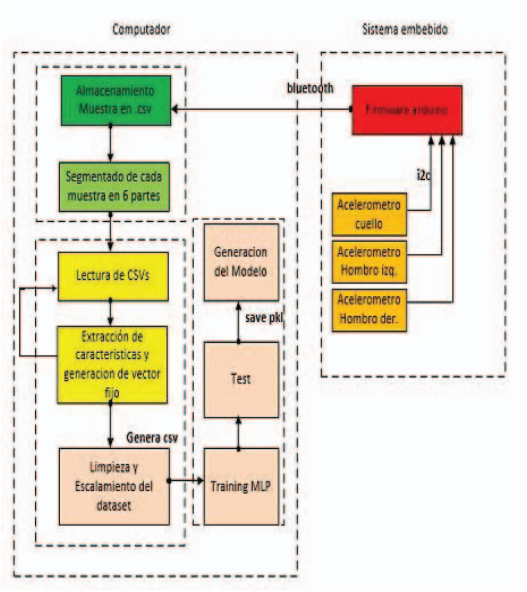


Fig. 4. Arquitectura del software

B. *Adquisición de datos*

Se evaluó cuidadosamente la posición de los sensores inerciales para garantizar una buena capacidad del sensor en la detección y discriminación de diferentes posiciones del cuello; y de esta manera poder predecir la mala postura. Para ello, se tomó en cuenta la figura 5.

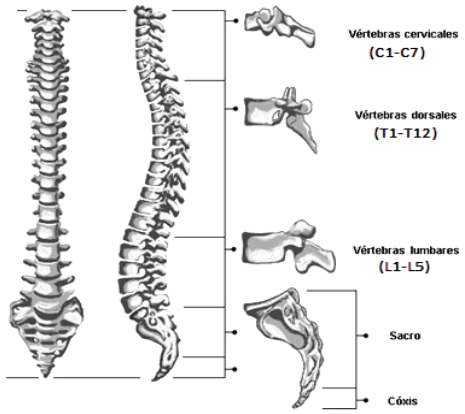


Fig. 5. Sustento anatómico y Biomecánico

Para detectar los movimientos de FE (flexión - extensión) se colocó en correspondencia con el segmento de la columna cervical C1-C7, a lo largo de la dirección longitudinal se escoge la C4 para monitorear el eje.

Para el monitoreo de la postura en las que se involucran los hombros se eligió las articulaciones glenohumeral derecho e izquierdo debido a que ofrece la información de la orientación de la cabeza en el plano transversal con alta precisión, ello se muestra en la figura 6 que detalla el posicionamiento de los tres sensores en el usuario. Por lo tanto, dado que la inclinación del cuello y los hombros determinan la adecuada postura que debe tener una persona,

se proponen realizar las predicciones y medidas para 8 tipos diferentes de postura, tal como se muestra en la tabla 1.

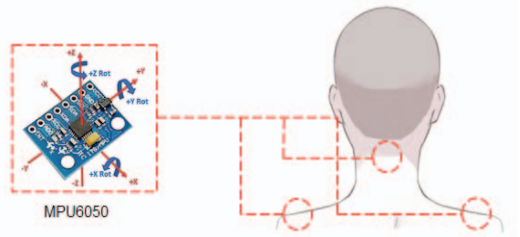


Fig. 6. Posicionamiento de los 3 sensores puestos en el usuario

TABLA 1: ETIQUETADO DE LAS POSTURAS

Actividades (Posturas)	Descripción
Tipo_0	Cuello, Hombro izquierdo y Hombro derecho en posiciones desconocidas.
Tipo_1	Cuello en posición Normal, Hombro izquierdo Normal, Hombro derecho Normal.
Tipo_2	Cuello en posición Normal, Hombro izquierdo Normal, Hombro derecho Desviado.
Tipo_3	Cuello en posición Normal, Hombro izquierdo Desviado, Hombro derecho Normal.
Tipo_4	Cuello en posición Normal, Hombro izquierdo Desviado, Hombro derecho Desviado.
Tipo_5	Cuello en posición Desviado, Hombro izquierdo Normal, Hombro derecho Normal.
Tipo_6	Cuello en posición Desviado, Hombro izquierdo Normal, Hombro derecho Desviado.
Tipo_7	Cuello en posición Desviado, Hombro izquierdo Desviado, Hombro derecho Normal.
Tipo_8	Cuello en posición Desviado, Hombro izquierdo Desviado, Hombro derecho Desviado.

C. *Segmentación y etiquetados de datos*

Dado que existe una relación entre las aceleraciones y las inclinaciones de una determinada articulación del cuerpo humano [13], se realiza las mediciones de 3 sensores acelerómetros ubicados en el cuerpo humano de una persona como se muestra en la figura 6. El Arduino lee los 3 componentes de la aceleración de cada sensor a través del protocolo I^2C. Posteriormente, las medidas de aceleración (9 componentes en total) son filtradas digitalmente [13] y enviadas hacia la computadora portátil mediante una transmisión bluetooth a 115200 bps de velocidad y periódicamente cada 100 ms.

El proceso de muestreo se realiza durante un total de 5 segundos por cada postura. Las medidas de aceleración son almacenadas en la computadora portátil en un archivo con formato CSV. Posteriormente, se realiza un segmentado de datos, el cual consiste en dividir los archivos con los datos originales en 6 partes iguales, con el fin de incrementar la cantidad de muestras para mejorar los resultados en los modelos de aprendizaje supervisado.

Cada archivo segmentado representa la medida de 9 componentes de aceleraciones en función del tiempo. En esta etapa del proceso, será necesario aplicar distintas funciones matemáticas para obtener un conjunto de características o atributos, que representen el archivo segmentado. Estas medidas incluyen el uso de funciones matemáticas [16], tales como la transformada de Fourier discreta, valores máximos, mínimos, etc.

IV. RESULTADOS

A. *Generalización de la matriz dataset*

El dataset se crea a partir de las características de cada archivo segmentado (muestra). En total se obtuvieron 1620 muestras.

Cada muestra cuenta con los siguientes atributos:

- max_{axis}_{pos}: Valor máximo de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello).
- min_{axis}_{pos}: Valor mínimo de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello).
- rms_{axis}_{pos}: Raíz cuadrada média (RMS) de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello).
- Iq_{axis}_{pos}: Intervalo intercuartil de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- kurt_{axis}_{pos}: Kurtosis de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- skew_{axis}_{pos}: Skewness de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- mean_{axis}_{pos}: Media de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- median_{axis}_{pos}: Mediana de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- std_{axis}_{pos}: Desviación estandar de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- stdabs_{axis}_{pos}: Desviación estandar absoluta de la aceleración por eje (axis) y posición (hombro izq, hombro der, o cuello)
- actividad: Actividad relacionada a la muestra, el cual es representado por un número entero, correspondiente a los mostrados en la tabla 1. Esta etiqueta es considerada el target o clase que caracteriza una determinada postura.

B. *Preparación de los datos*

Se realiza la normalización de los datos para mantener la misma escala en cada una de las columnas del dataset. La figura 7 representa una muestra de los datos escalados antes de aplicar los algoritmos estudiados.

Data antes de Estandarizar...

	max_ax_cu	min_ax_cu	rms_ax_cu	Iq_ax_cu	kurt_ax_cu	skew_ax_cu	mean_ax_cu	median_ax_cu	std_ax_cu
0	2.55	2.45	2.500224	0.0550	-1.351403	0.144068	2.500	2.490	0.033466
1	2.55	2.45	2.502183	0.0525	-1.083999	-0.169677	2.502	2.505	0.030265
2	2.53	2.40	2.483298	0.0475	-0.306044	-0.818606	2.483	2.495	0.038484
3	2.62	2.40	2.530794	0.0650	-0.442266	-0.628526	2.530	2.540	0.063403
4	2.63	2.44	2.537867	0.1150	-1.478703	-0.076941	2.537	2.540	0.066340

5 rows × 90 columns

Data despues de Estandarizar...

	max_ax_cu	min_ax_cu	rms_ax_cu	Iq_ax_cu	kurt_ax_cu	skew_ax_cu	mean_ax_cu	median_ax_cu	std_ax_cu
0	-2.628257	-2.317670	-2.802234	-0.287130	-1.034823	0.157403	-2.495945	-2.491792	-0.370057
1	-2.628257	-2.317670	-2.801227	-0.294099	-0.732759	-0.317079	-2.495020	-2.484871	-0.383220
2	-2.637722	-2.339747	-2.810931	-0.308035	0.146031	-1.298466	-2.503813	-2.489485	-0.349424
3	-2.595127	-2.339747	-2.786526	-0.259257	-0.007847	-1.011005	-2.482062	-2.468721	-0.246945
4	-2.590394	-2.322085	-2.782892	-0.119890	-1.178624	-0.176833	-2.478823	-2.468721	-0.234868

5 rows × 90 columns

Fig. 7. Escalamiento de la data

Se dividen los datos en entrenamiento y validación como se muestra en la figura 8.

```
Tamaño del conjunto de datos Inicial: (1620, 91)
Tamaño del conjunto de características del entrenamiento: (1134, 90)
Tamaño del conjunto de características de prueba: (486, 90)
Tamaño de la variable objetivo del entrenamiento: (1134,)
Tamaño de la variable objetivo de prueba: (486,)
```

Fig. 8. Data train y data test

C. *Diseño del modelo de árbol de decisión*

El árbol de decisión a diferencia de las redes neuronales, permite estimar cuáles son las variables más importantes en la fase de entrenamiento.

Se inicia el entrenamiento sin ajuste de hiperparametros, el cual resulta con un score de 1.0 en el train y 0.98148 en el test.

Luego, empleando un grid search para obtener los mejores hiperparámetros del árbol de decisión (max_depth = 5, min_samples_leaf = 0.06) se obtiene un score de 0.9682 en el train y 0.96707 en el test.

Por último, se extraen las características principales tomadas en cuenta por el árbol usando la función feature_importances_. Los resultados son los siguientes:

- mean_az_hi: 0.1322
- median_az_cu: 0.1281
- median_ay_hd: 0.1274
- max_az_cu: 0.127
- mean_az_hd: 0.1244
- rms_ay_cu: 0.1243
- rms_ax_hi: 0.1222
- mean_ay_hd: 0.114

Dado que los atributos tienen valores similares, se puede afirmar que no existe un atributo que concentre la mayor importancia.

D. *Diseño del modelo de random Forest*

Un modelo mejorado del árbol de decisión es el random Forest, el cual hace uso de varios árboles de decisión, para mejorar la predicción del modelo.

Se inicia el entrenamiento del modelo sin ajuste, resultando en un score para train de 1.0 y para test de 0.987.

Usando el algoritmo grid search, se obtienen los siguientes parámetros: max_depth=5, min_samples_leaf =0.01, n_estimators = 50. Para este modelo, se limitó el número de estimadores entre 10 a 50, debido al alto coste computacional del grid search para un random Forest.

El score final del randomForest optimizado es de 0.9832 para el train y 0.97942 para el test.

E. *Diseño del modelo de KNN*

Este modelo se basa en asociar los K vecinos más cercanos en el campo hiperdimensional de la data.

Se inicia con un entrenamiento sin ajuste, el cual da como resultado un score de 0.97 para el train y 0.93 para test.

Usando el algoritmo grid search, se obtienen los siguientes hiperparámetros: metric='manhattan', n_neighbors=3.

Luego del ajuste, se obtiene un score de 0.9902 en el train y 0.979 en el test

F. ***Diseño del modelo de redes neuronales MLP***

Un modelo de redes neuronales Multilayer Perceptron (MLP) consiste en un modelo de aprendizaje supervisado compuesto por un conjunto de capas de neuronas interconectadas entre sí, que son empleadas para problemas de de clasificación multiclase. El aprendizaje de la red neuronal MLP utiliza el algoritmo de backpropagation en la fase de entrenamiento.

El modelo MLP implementado está compuesto 90 neuronas en la capa de entrada, 40 neuronas en la capa oculta y 8 neuronas en la capa de salida.

Para el entrenamiento se utilizó la técnica denominada cross validation. Los resultados se observan en la figura 9. Siendo los 6 primeros resultados del train y los últimos resultados de la validación.

```
K: 1  --  Accuracy: 1.0
K: 2  --  Accuracy: 1.0
K: 3  --  Accuracy: 1.0
K: 4  --  Accuracy: 1.0
K: 5  --  Accuracy: 1.0
K: 6  --  Accuracy: 1.0
K: 1  --  Accuracy: 0.9735449735449735
K: 2  --  Accuracy: 0.9682539682539683
K: 3  --  Accuracy: 0.9682539682539683
K: 4  --  Accuracy: 0.9735449735449735
K: 5  --  Accuracy: 0.9788359788359788
K: 6  --  Accuracy: 0.9841269841269841
Media de cross_validation 0.9744268077601411
```

Fig.9. Cross validation

Con el entrenamiento realizado de la red neuronal MLP, se obtiene un score de 0.9855. La matriz de confusión de la red neuronal entrenada se muestra en la figura 10.

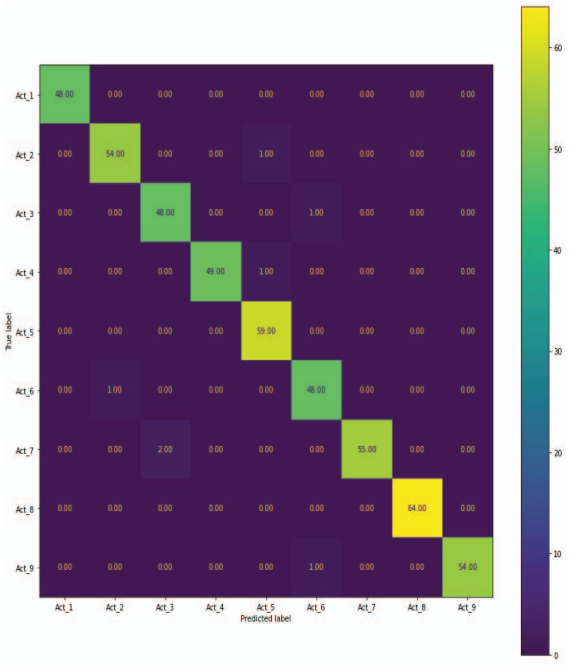


Fig.10. Matriz de confusión del modelo MLP

G. *Análisis sobre las mejores características*

En el modelo de árbol de decisión se analizó cuáles son las features más importantes para este modelo, los cuales se muestran en la figuras 11 y 12. Eligiendose las características con mayor importancia, se reentrenan cada uno de los modelos y se obtienen distintos resultados, tal como se observa en la tabla 3 y en la figura 13.

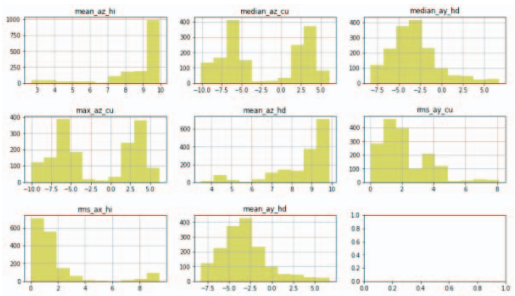


Fig.11. Análisis de las mejores características

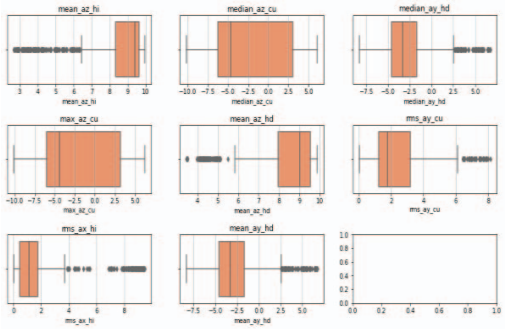


Fig.12. Gráfica de cajas de las mejores características

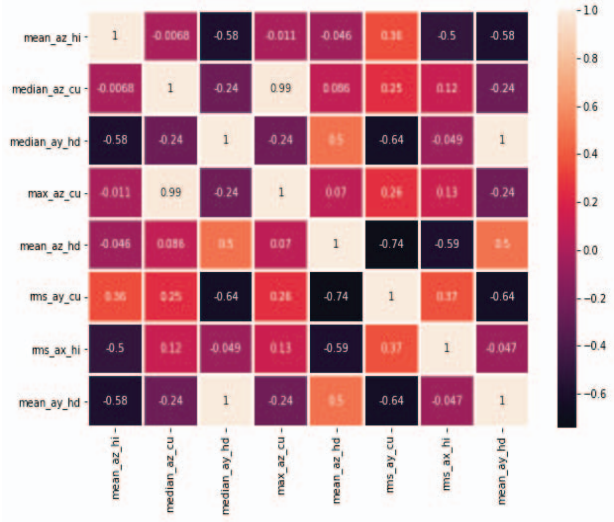


Fig.13. Matriz de correlación de los mejores características

TABLE I. RESULTADOS DE ENTRENAMIENTO Y TEST 1

	Árbol de decisión	*Random Forest*	*KNN*	*MLP*
Train	0.9761	0.9797	1	0.9823
Test	0.9691	0.97119	0.9855	0.9794

TABLE II. RESULTADOS DE ENTRENAMIENTO Y TEST 2

	Árbol de decisión	*Random Forest*	*KNN*	*MLP*
Train	0.9682	0.9832	0.9902	0.9744
Test	0.96707	0.97942	0.979	0.9856

V. CONCLUSIONES

- Si bien el score de los modelos entrenados solo con las mejores características fue levemente menor al de los modelos que incluían todas las características, ellos tuvieron un rendimiento superior al reducir el tiempo de entrenamiento y la carga computacional.
- Los modelos basados en redes neuronales y Random Forest tuvieron los mejores resultados para la predicción de posturas.
- Los atributos más relevantes del modelo fueron el valor medio de la aceleración en el eje z del hombro izquierdo y la mediana de la aceleración en el eje z del cuello.
- La mayoría de modelos propuestos dieron resultados superiores a 0.967, lo cual implica que los modelos son capaces de predecir con gran eficacia las distintas posturas clasificadas.

REFERENCIAS

[1] D. Giansanti, L. Colombaretti, R. Simeoni, and G. Maccioni, "The Text Neck: Can Smartphone Apps with Biofeedback Aid in the Prevention of This Syndrome," in *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation III*, Cham, 2019, pp. 754–758, doi: 10.1007/978-3-030-01845-0_150.

[2] D. David, C. Giannini, F. Chiarelli, and A. Mohn, "Text Neck Syndrome in Children and Adolescents," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2021, doi: 10.3390/ijerph18041565.

[3] J. Fares, M. Y. Fares, and Y. Fares, "Musculoskeletal neck pain in children and adolescents: Risk factors and complications," *Surg Neurol Int*, vol. 8, May 2017, doi: 10.4103/sni.sni_445_16.

[4] S. Neupane and U. T. I. Ali, "Text Neck Syndrome - Systematic Review," vol. 3, no. 7, p. 8, 2017.

[5] R. Ladera and J. Mariela, "Dolor cervical y su relación con los factores posturales en estudiantes de educación secundaria de una Institución Educativa de San Juan de Lurigancho," *Universidad Católica Sedes Sapientiae*, 2018, Accessed: Mar. 28, 2021. [Online]. Available: http://repositorio.ucss.edu.pe/handle/UCSS/651.

[6] S. Berolo, R. P. Wells, and B. C. Amick, "Musculoskeletal symptoms among mobile hand-held device users and their relationship to device use: A preliminary study in a Canadian university population," *Applied Ergonomics*, vol. 42, no. 2, pp. 371–378, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.apergo.2010.08.010.

[7] S. Thiyagarajan and S. Telegbal, "Text Neck: Is it a New Term for Physiotherapist?," *Indian Journal of Medical & Health Sciences*, vol. 2, pp. 119–121, Jan. 2015, doi: 10.21088/ijmhs.2347.9981.2215.11.

[8] E. Gustafsson, S. Thomée, A. Grimby-Ekman, and M. Hagberg, "Texting on mobile phones and musculoskeletal disorders in young adults: A five-year cohort study," *Applied Ergonomics*, vol. 58, pp. 208–214, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.06.012.

[9] G. Camacho and T. Nakazato, "Looking at the smartphone screen for a prolonged time is associated with chronic neck pain, specially in young adults," *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 61, p. e113, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.rehab.2018.05.244.

[10] Cuéllar, J. M., & Lanman, T. H. (2017). "Text neck": an epidemic of the modern era of cell phones?. The Spine Journal, 17(6), 901-902.

[11] K. K. Hansraj, "Assessment of stresses in the cervical spine caused by posture and position of the head," *Surg Technol Int*, vol. 25, pp. 277–279, Nov. 2014.

[12] S. Z. Genez Tarrifa and R. De la Hoz Lara, "Text Neck, More Technology, Less Health?," in *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, Cham, 2019, pp. 758–767, doi: 10.1007/978-3-319-96065-4_79.

[13] I.-C. Severin, "Head Posture Monitor Based On 3 IMU Sensors: Consideration Toward Healthcare Application," in *2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*, Oct. 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/EHB50910.2020.9280106.

[14] H. K. Jang, H. Han, and S. W. Yoon, "Comprehensive Monitoring of Bad Head and Shoulder Postures by Wearable Magnetic Sensors and Deep Learning," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 22, pp. 13768–13775, Nov. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3004562.

[15] D. Lo Presti *et al.*, "A Multi-Parametric Wearable System to Monitor Neck Movements and Respiratory Frequency of Computer Workers," *Sensors*, vol. 20, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20020536.

[16] T. Kim, S. Chen, and J. Lach, "Detecting and Preventing Forward Head Posture with Wireless Inertial Body Sensor Networks," in *2011 International Conference on Body Sensor Networks*, May 2011, pp. 125–126, doi: 10.1109/BSN.2011.41.

Sistema evaluador de exámenes académicos digitalizados, utilizando deep learning y visión artificial

Digitalized academic exam evaluation system, using deep learning and computer vision

Angel Espinoza
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
angel.espinosa@utp.ac.pa

José Carlos Rangel
Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigación (SNI) SENACYT,
Ciudad de Panamá, Panamá
jose.rangel@utp.ac.pa

***Abstract*— The proposed system has the target of build a platform with the objective of academic exam creation and evaluation with the productivity and easiness in mind, for the teacher o user. This will achieve with the use of tools of deep learning and computer vision. Where with multiple types of methodologies for: investigation, using standard steps; software, implementing agile's frameworks; and artificial intelligence, with steps defined for this purpose. Will be building a web software, who allows feed with one or more academic exams, using answer's sheet and bring the student's scores owned by the teacher or user. With this idea in mind, the system was designed and implemented, where we have a modularized system with this structure: core, for the main evaluation process; backend, server for petitions for the platform and the frontend, the interface that will be used by the teachers. With the system complete, some test and evaluations were doing, with a performance for diary use, with about 84%, a tiny error margin (about 40%) and evaluation time of average less than 15 seconds. With these tests, the idea for building a platform for teachers was achieved and get a tool with good performance, that can be flawlessly used by teachers inside a web browser.**

Keywords*— *Deep Learning, Academic exam, Machine Learning, Optical mark recognition, Computer vision

***Resumen* — El sistema propuesto tiene como meta elaborar una plataforma para crear y evaluar exámenes académicos, haciendo énfasis en la productividad y facilidad para los docentes. Esto será logrado mediante el uso de técnicas de deep learning y visión artificial. Donde mediante diferentes metodologías para: investigación, software, utilizando entornos de trabajos agile; y de inteligencia artificial. Será elaborado un software de carácter web, el cual permitirá ingresar uno o varios exámenes académicos, mediante su hoja de respuestas y dar los resultados de los estudiantes correspondiente al docente. Con la idea concreta definida, se procedió al diseño e implementación donde se obtuvo un sistema modularizado estructurado de la siguiente manera: core, para el proceso principal de evaluación; backend, servidor para atender peticiones de la plataforma y frontend, interfaz con la que interactuará los docentes. Una vez concretizada la idea, se sometió a pruebas donde se obtuvo un desempeño aceptable para uso diario de aproximadamente un 84%, un bajo margen de error (menor de 40%) y un tiempo de evaluación promedio menor de 15 segundos. Con lo cual la idea de crear una plataforma para docentes fue lograda y como resultado se obtuvo una herramienta robusta y eficiente la cual puede ser utilizada por los docentes mediante un navegador web, sin mayor tipo de complicaciones.**

Palabras claves — Deep learning, Exámenes académicos, Machine learning, Reconocimiento óptico de marcas, Visión artificial

I. Introducción

En la actualidad los profesores de universidades y algunos colegios, cuentan con grupos de aproximadamente treinta (30) estudiantes cada uno [1]. Esto significa que el número de asignaciones por estudiante es considerable. Para agravar la situación, los ítems como exámenes o *quices* son los que poseen mayor ponderación en la nota del estudiante, por lo cual es muy importante que estos exámenes sean evaluados de la forma más objetiva posible [2].

Tomando en cuenta esta problemática de los profesores, el sistema propuesto busca implementar un software que brinde facilidad y eficiencia en el proceso de calificación. Sin embargo, no es el único software disponible en esta categoría. Específicamente en el caso de softwares para calificado de exámenes digitalizados, se tratan de paquetes de softwares de alto costo y los cuales solo una institución de amplios recursos puede manejar. Entre las empresas dedicadas a este propósito están: Remark, AddMen, LeadTools y empresas que brindan paquetes y formularios como Scantron. Por otra parte, para software no dedicados específicamente para la evaluación están: Moodle, Kahoot, Edmodo, Zip Grade y GradeScope [3] [4]. Sin embargo, algunos, se limitan a solo dar una plataforma para interacción del estudiante y profesor, y no ofrecen un entorno completo para el flujo de calificaciones. Otras plataformas de esta categoría brindan servicios, ya que utilizan el modelo de software *freemium* [5].

De manera técnica, normalmente cuando se refiere a las tecnologías utilizadas para la calificación de exámenes académicos son: el Reconocimiento Óptico de Marcas (OMR) y el Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR), la cual consiste en la extracción de texto de una imagen [6] [7].

A. Justificación

Al tratarse elementos esenciales para la sociedad, la educación es básicamente uno de los primeros en presentarse. Es principal productor de recurso humano para trabajos existentes o nuevos (como los emprendimientos) [8].

En la educación es necesario utilizar un indicador para que el docente sepa cómo es el desempeño de un estudiante en un área o asignatura específica. Cuando se habla de calificaciones, como indicador, es uno de los elementos más

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00040

influyentes. Estos pueden ser obtenidos mediante parciales, quices o semestrales. Por lo que generalmente se tratan de actividades académicas para medir conocimiento y su ponderación en la nota final es bastante alta. Teniendo esto en cuenta, es necesario que estas calificaciones sean realizadas con un alto grado de precisión y objetividad [9]. Sin embargo, ya sea por presión al calificar o factores externos (como cansancio), muchas veces la evaluación de los exámenes no refleja la puntuación real del estudiante.

El sistema propuesto busca mitigar muchos de los problemas al evaluar un examen y cubrir esta necesidad. Normalmente las tareas de calificación son repetitivas, por lo que un sistema automatizado sería útil para este propósito. Como aporte científico brindará la posibilidad de evaluar el examen mediante sus secciones, algoritmos de OMR implementando ML resultando una herramienta eficiente para evaluar exámenes académicos.

B. Delimitación

El proyecto será desarrollado para entornos universitarios locales. En la realización de pruebas se utilizarán datos recolectados para mejorar la herramienta en desarrollo y reentrenar modelos de ML y DL. Por último, el tipo de exámenes para realizar las pruebas de la herramienta, serán de tipo parcial o quices. Pero no limitándose a estas.

El resto del documento se estructura de la siguiente forma: el siguiente punto nuestra la metodología; y como fue diseñado y desarrollado el sistema. Luego se pondrá a prueba el sistema desarrollado y se mostrará los resultados obtenidos y el análisis o discusión de éstos. Analizadas las pruebas, se expresará las conclusiones o síntesis relacionados al desarrollo y resultados obtenidos.

II. METODOLOGIA Y MATERIALES

En el proyecto fueron utilizados diferentes metodologías o pasos para desarrollar diferentes puntos de la creación sistema propuesto.

A. Metodologías

Al ser un proyecto de desarrollo o carácter científico, es necesario aplicar la metodología de la investigación (MI), de esta manera se tiene un flujo base para desarrollar el proyecto como el descrito a continuación [10]:

Observación y planteamiento del problema: concepción de la idea, necesidad y solución. En este caso la situación de los profesores analizada anteriormente.

Revisión de la literatura: donde para este proyecto consistió en buscar proyectos relacionados a la necesidad encontrada. En este punto se incluye los antecedentes de softwares similares a la propuesta y las técnicas relacionadas a éste.

Diseño y construcción de la propuesta: donde se crea la arquitectura y se implementa en forma de software. En este punto se realiza la planificación del flujo de trabajo, donde se establecen recursos y tiempo [11]. También se definen qué herramientas se va a usar y la metodología del software a manejar. En este proyecto fue SCRUM [12], *test driven development* (TDD) [13] y *C4 model* [14]. Luego se realiza la construcción del software y su integración, donde se toma el módulo de funcionalidad con la interfaz gráfica.

En la metodología de software, también se incluye la metodología para manejar modelos inteligentes de ML y DL. Estas metodologías cuentan con pasos como: obtención de datos, preprocesamiento de estos datos, elección de algoritmos y modelos bases, entrenamiento de modelo y pruebas con el modelo creado [15] [16]. También se incluyen flujos para manejar procesos de visión artificial, donde se maneja un pipeline con los siguientes subprocesos: preprocesamiento de la imagen, selección del área de interés (ROI), procesamiento del ROI y la toma de decisiones [17]. Los cuales determinarán como serán procesados los exámenes con el objetivo de obtener el puntaje del alumno.

Recolección y análisis de datos: validación y pruebas. Aquí se valida la herramienta creada y se evalúa su efectividad y eficiencia en los procesos individuales y generales.

Presentación de resultados: análisis del desempeño del sistema. Se toma los datos y se llevan a estadísticas en formas de tablas o gráficas, para llevarlas a discusión y comparación con otras herramientas.

Integración continua: Basándose en las pruebas, se buscan los puntos a fortalecer y características nuevas que puedan beneficiar la herramienta.

B. Materiales, software y librerías utilizadas

Entre las herramientas utilizadas e implementadas en este sistema, se encuentran: Python, C++, C# y JavaScript; como lenguajes de programación. Para el caso de las librerías de software principales, se pueden mencionar: OpenCV, Tensor Flow, ScikitLearn, PyTorch, Redis y Tesseract OCR

C. Propuesta de solución

El sistema o proyecto busca implementar una versión mejorada y adaptada de las propuestas actuales. Esta solución busca integrar características propias, como lo es la orientación a los docentes y la detección de secciones del examen. Este software implementará la integración de ML y DL con visión artificial. Su entrada será un examen físico digitalizado; y la salida será el puntaje total del estudiante, ver Fig. 1.

D. Desarrollo

El software estará estructurado por tres módulos lógicos y una base de datos. Cada módulo tendrá una función específica, ya sea manejar el proceso de calificación o recibir instrucciones del usuario. Estos módulos se pueden visualizar en la Fig. 2, donde se muestra la interacción entre estos y las tecnologías en las que se encuentra implementado.

1) Módulos

Los módulos principales son básicamente divididos según la funcionalidad que realizan en el sistema o software. Entre los módulos se encuentran: *core*, *backend* y *frontend*.

El *core* consiste en el módulo encargado de hacer las funcionalidades bases del sistema. Estas incluyen el procesamiento y creación de exámenes y gestión de procesos. El *backend* es el módulo encargado de gestionar las peticiones de los usuarios e interactuar con el *core*, para activar las acciones de creación y evaluación de exámenes. El *frontend* es la interfaz con la que interactúa el usuario (Fig. 3).

2) Modelos de ML

El sistema contará con varios modelos de ML, uno para manejar el contenido de las marcas de matrices de las respuestas utilizando algoritmos de ML clásico; y el otro modelo, será una red neuronal para detectar el contenido de los delimitadores de las secciones, utilizando DL.

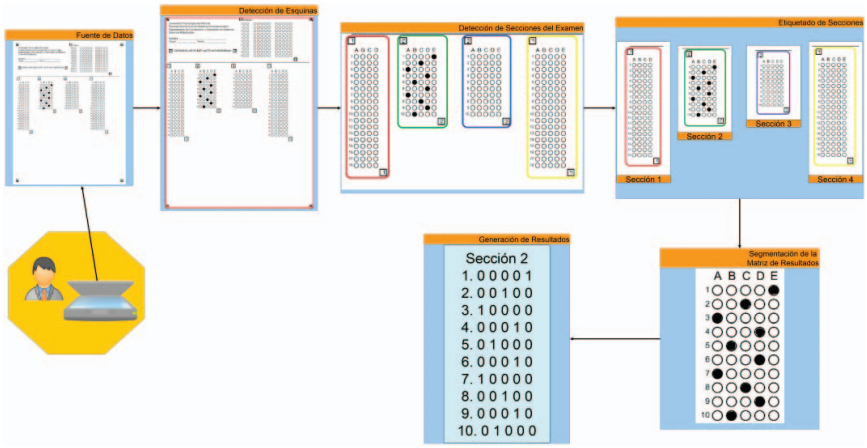


Fig. 1. Pasos del proceso de calificación de exámenes por parte del software propuesto.

El modelo de ML clásico utilizará algoritmos como OMR, para la detección de matrices; *voting* (SVM), como ensamble de múltiples clasificadores para decidir si la marca está rellena; y K-means, para la agrupación de los círculos en las marcas.

La creación y entrenamiento del modelo de ML, fue realizado con datos de marcas de matrices digitalizadas y rellenas a mano con lápiz de escribir común (Fig. 4). Los cuales fueron etiquetados para denotar si la marca estaba rellena o vacía.

El segundo modelo (de DL) fue en cierto aspecto más automatizado. Ya que solamente bastó armar el conjunto de datos de imágenes para los indicadores de secciones de exámenes y etiquetarlos. El objetivo de detección de esta red neuronal son los caracteres encargados de delimitar las esquinas de cada sección o matriz de preguntas o exámenes (Fig. 5). Estos caracteres están elaborados con una fuente especial para este propósito.

La red neuronal posee una arquitectura basada en un modelo utilizado para descifrar los sistemas de captcha simples [18]. Al ser un modelo de DL, este está compuesto por múltiples capas las cuales se organizan en una arquitectura (Fig. 6). La primera capa consiste en 20 filtros y una entrada 20x20x1 y un *kernel* de 5x5 y una activación de tipo *relu*. La segunda capa se configura con 50 filtros y un *kernel* de la misma dimensión que la etapa anterior. Cada una de estas capas estarán seguidas por una capa de tipo *pooling*. Una vez transcurridas las dos primeras capas de filtros, las características irán a los perceptrones multicapa y cuyos parámetros son ajustados en el momento del entrenamiento. Estas capas consistirán en 500 unidades y una capa de activación *relu*. Por último, la arquitectura cuenta con otra capa de tipo dense, la cual se encarga de dar la probabilidad de cada clase (Fig. 6).

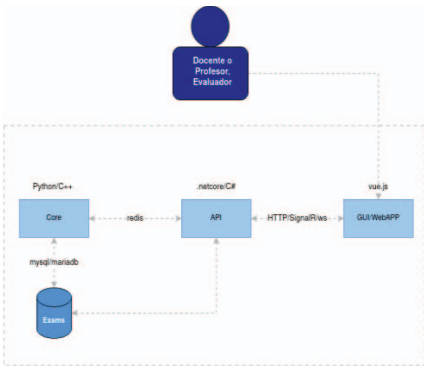


Fig. 2. Diagrama de módulos principales y la forma en cómo son comunicados. Los textos entre líneas son las tecnologías de transmisión entre componentes.

Para la creación del conjunto de datos, fueron generadas plantillas para los identificadores. Cada uno de estos se estructuró con una nomenclatura de la siguiente forma: "iT#_class", donde "#" es el carácter de la sección. Estos caracteres van desde el 0 al 15 en hexadecimal (0-F) y se incluyen acrónimos especiales para denominar las identificaciones de alumno y examen (AL e ID) (Fig. 7).

Luego del proceso de generación de las imágenes fue aplicado el proceso de aumentados de datos, esto produjo una mayor variedad de archivos e instancias para el entrenamiento. En esta fase fue aplicado filtros como: Filtro Gaussiano , Ruido, Corrección gamma inversa, Brillo y contraste, Transformada de erosión y transformada de dilatación. Luego se procede al etiquetado del conjunto de datos, similar a como se realizó en el proceso de ML clásico, para cada imagen se indicó manualmente cual carácter está dentro de esta. Con el conjunto de datos listo, se procedió al preprocesamiento de este, el cual consistió en procesos como: escala de grises, redimensión de matriz al tamaño de entrada de la red neuronal, normalización de los valores de los píxeles, división de conjunto en entrenamiento y prueba y serialización de las etiquetas en forma binaria.

Una vez los datos preprocesados, entran en la red neuronal para empezar con el proceso de entrenamiento. Este proceso consistió en 20 épocas o iteraciones y un *batch* de 32. El resultado obtenido de esta red neuronal entrenada se puede visualizar por medio de los gráficos de accuracy (Fig. 8) y la matriz de confusión (Fig. 9), obtenido de este al momento de utilizar el conjunto de prueba. Con estos gráficos se puede observar que el modelo posee un comportamiento adecuado. Adicional a estos gráficos, el accuracy obtenido

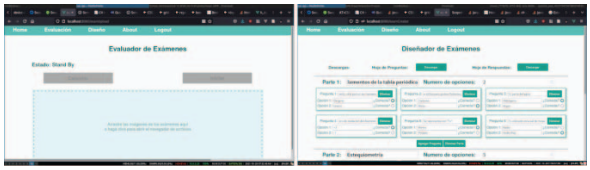


Fig. 3. Interfaz web (frontend) para la evaluación (izquierda) y creación (derecha) de exámenes.

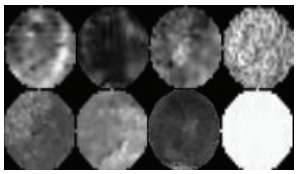


Fig. 4. Ejemplares de marcas extraidas del conjunto de datos para el modelo de *ML* clásico.

numéricamente también muestra un porcentaje aceptable con aproximadamente un 98% .

3) Módulos y algoritmos de visión artificial

Para complementar los modelos de ML, se implementaron módulos los cuales se encargarán de realizar la segmentación de la imagen del examen. Específicamente estos módulos consisten en: binarizador de examen, extractor de centros, módulo OCR y detector de formas cuadradas.

El binarizador de examen, es un proceso de filtrado el cual se encarga de facilitar la extracción de formas geométricas y eliminar detalles no relevantes para el análisis. La extracción de centros es el proceso donde se toma la matriz de marcas y se obtienen u organizan los centros junto con las formas circulares. Para el caso del módulo OCR, es uno de los más simples, este se encarga de detectar el identificador del examen. Para el caso de la detección de secciones, el módulo de detector de formas cuadradas es el utilizado antes de que la red neuronal proceda a deducir el contenido de los delimitadores.

III. Resultados y discusión

A. Conjunto de Pruebas

El conjunto para las pruebas consistirá en ejemplares basados en diferentes modelos (ver Tabla 1). Estos ejemplares serán duplicados, llenados a mano y digitalizados mediante escáner. Con los modelos duplicados se tendrán de 10-20 exámenes por cada modelo. Para la evaluación de los ejemplares, se realizará de forma individual para cada examen. El puntaje será calculado mediante la suma del total de las preguntas correctas y multiplicado por una ponderación dependiendo del modelo (Tabla 1).

Adicional, serán sumados unos valores simbólicos para las secciones de identificación de examen (0.01 al total obtenido) y la identificación del alumno (0.05). Los criterios de cada sección estarán dados de la siguiente forma:

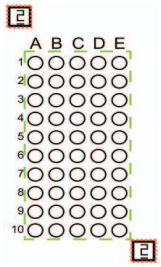


Fig. 5. Ejemplo de posición de los delimitadores (rojo, punteado) y la matriz de respuesta (verde, guiones)

Tabla 1. Listado de la ponderación por modelos junto con la cantidad de ejemplares de cada modelo y su aportación al puntaje total.

Modelo	Ponderación por modelo	Cantidad de Ejemplares	Puntaje total
Simple	0.1	13	1.3
Normal	0.2	16	3.2
Intermedio	0.3	14	4.2
Difícil	0.4	18	7.2
Avanzado	0.5	19	9.5

ID del examen: es la detección correcta en su totalidad del ID. De ser el caso se suma 0.01 al accuracy obtenido.

Matrices correspondientes de las partes: El accuracy será calculado dividiendo la cantidad de preguntas con la marca correctamente detectada entre la cantidad total de preguntas, multiplicado por el accuracy del modelo visto en la Tabla 2.

Para obtener los datos se siguieron los siguientes pasos: impresión del ejemplar, llenado del ejemplar, escaneado o digitalizado del examen, obtención o recolección para su evaluación. Una vez recolectadas todas las instancias, se procedió a un etiquetado sucesivo con el objetivo de poder distinguirlas y tener un orden en su evaluación.

B. Análisis general

Generalmente el sistema obtuvo un desempeño aceptable marcando un accuracy de aproximadamente un 84% en la evaluación ponderada y un 83% en evaluación sin ponderación. El modelo de detección de marcas se entrenó usando descriptores que consistieron en los histogramas de las imágenes de las marcas. Al validar este modelo obtuvo un accuracy de 95%.

1) Análisis cualitativo

De manera no numérica se puede deducir que el sistema logró manejar muchas situaciones las cuales a simple vista parecían que podían afectar la evaluación realizada. Casos como borrones en las marcas, distorsiones en el escaneo, ruido en la imagen, entre otros; fueron puntos donde el sistema pudo manejarse y dar los resultados esperados o parte de ellos (en los casos que se generaba algún error).

2) Causas de fallo en exámenes con problemas

Entre las categorías donde existió algún fallo (regular y malo), se encontraron causas las cuales produjeron estos comportamientos irregulares. Entre las más comunes se pueden listar y apreciar el gráfico de la Fig 10: Confusión del indicador número 3 con el 9 (3 → 9); Confusión de ID con otro carácter (ID); Confusión de AL con otro carácter (AL); Problema en la detección de matriz (Matrix); Causas variadas (Otros).

Los resultados con ponderación se pueden apreciar en la Fig. 11. En los puntajes se puede observar que existe una tendencia entre la evaluación de 70% y un 100%, lo cual

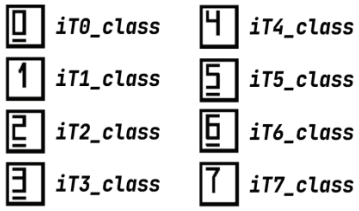


Fig. 7. Imágenes y etiquetas obtenidas del conjunto de datos generado.

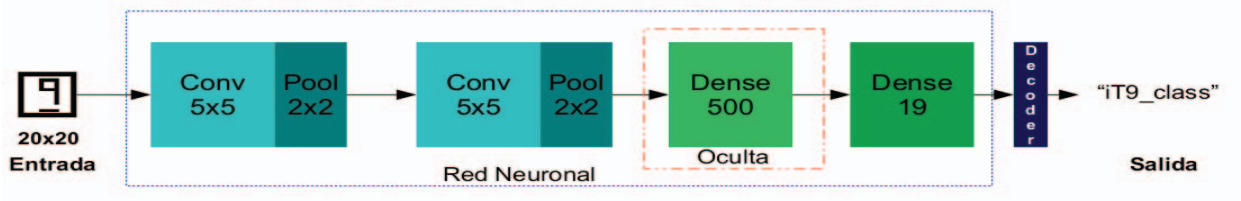


Fig. 6. Arquitectura de la red neuronal. Las capas de color turquesa son las de filtros y las verdes son las consideradas como densas y ocultas.

coincide con el accuracy obtenido, que es un valor dentro de este rango. En el gráfico se puede apreciar que casi todos los modelos obtuvieron al menos una instancia de fallo en 0%, sin embargo, para el modelo avanzado no hubo ejemplar con esta evaluación. Adicionalmente para la evaluación ponderada, se puede observar que la complejidad del examen no es un factor muy relevante para el sistema.

En el análisis no ponderado, en el gráfico de la Fig. 12, se puede observar que la mayoría (más del 60%) cae en la categoría de 90%-100%, dando un desempeño en general bastante bueno y lo suficiente como para aplicar el sistema en

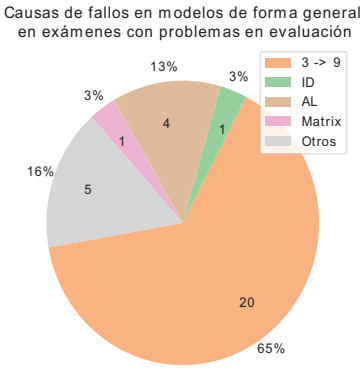


Fig. 10. Como se puede apreciar, de todas las causas, la causa "3->9" es la más predominante, lo que indica que una mejora en el modelo de *DL* solucionaría la mayoría de los problemas detectados.

un uso diario. Por otra parte, la categoría regular se encuentra con un 30% de los ejemplares, los cuales son instancias que aportaron puntaje, pero no como se esperaba, también ayudan a ver qué tipo de detalles hay que mejorar en el sistema. Por último, la categoría "malo" no llegó a un 10%, por lo que, con un bajo porcentaje de fallo.

C. *Elección de casos relevantes*

Para decidir cuales casos eran los más adecuados para el estudio, se calculó el accuracy promedio para cada modelo y se tomó el menor y mayor puntaje. Los cuales se les denominó Caso de Fallo para el de menor puntaje y Caso de estudio, para el mayor. En la Tabla 2 se puede visualizar los accuracies por modelos. Los modelos elegidos según los accuracy obtenidos fueron el modelo "simple" para representar el caso de estudio

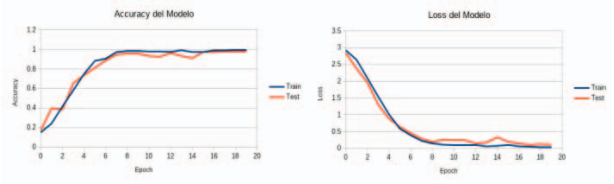


Fig. 8. Gráficos de accuracy y loss del modelo entrenado. Nótese el comportamiento inverso, el cual es esperado para obtener un buen modelo.

con un desempeño de 87.18% y el modelo "intermedio" con 76.19%.

D. *Caso de Estudio*

El caso de estudio fue elegido de los ejemplares pertenecientes al modelo "simple. De las instancias que se obtuvo un 100% fue elegido el ejemplar número siete (7). El ejemplar y la detección dada por el sistema se puede visualizar en la Fig. 13. La evaluación de esta instancia tomó aproximadamente 11 segundos en llevarse a cabo.

1) *Proceso de evaluación*

El proceso de evaluación para esta instancia fue completo y como se observa en la Fig. 14 se obtuvieron las detecciones de las matrices y otras secciones del examen tal como son en la realidad.

Este proceso fue iniciado con la detección de formas cuadradas e identificación del contenido de éstas. Donde fueron detectadas en total 12 formas, tal como se visualiza en el examen real (dos cuadrados por identificador). Y la detección de contenido y emparejamiento de cada identificador detectado fue como se puede visualizar en la Fig. 15. Donde cada coordenada de las secciones realiza un recorte exacto para extraer el contenido, sea una matriz o un identificador (como del examen). Cabe destacar que los recortes obtenidos de los emparejamientos correspondientes a las matrices comprenden cierta parte de la leyenda, por lo que, se dio la necesidad de calcular el margen relativo y eliminar estos artefactos de la imagen de cada matriz.

La identificación del examen fue recortada producto del emparejamiento de los identificadores "ID" y utilizando OCR, se obtuvo su contenido como "1912493F27DBX7724271A1XFAEBDA341", cadena que coincide con la identificación de este modelo visto en la Fig. 13 y Fig. 14.

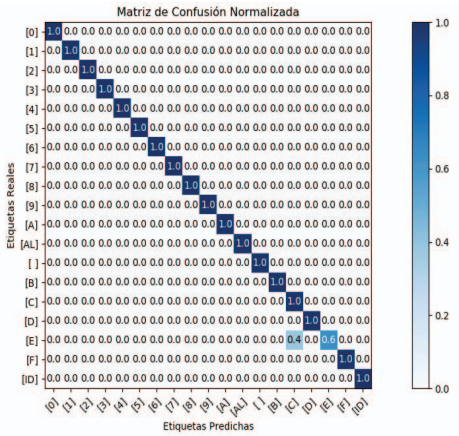


Fig. 9. Matrices de confusión (absoluta y normalizada) del modelo de *DL*.

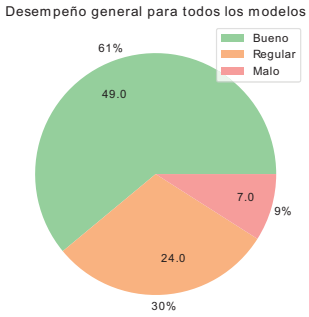


Fig. 12. Puntaje no ponderado de evaluación. La categoría buena va de 91% a 100% (verde), la regular, 65% a 90% (anaranjado) y la mala de 0% a 64% (rojo).

Para las matrices se realizó procesos de binarización, detección de contornos y centros; y la evaluación del contenido de cada marca en cada matriz. Cada uno de estos procesos obtuvieron un completo desempeño en su función y sus resultados se pueden apreciar en la Fig. 14.

E. Caso de Fallo

El caso de fallo es el contraste del caso de estudio dado en la instancia número 75 del modelo "intermedio", su puntaje total fue de 0%, ya que no se pudo obtener datos de este en las marcas, ni ninguna de sus secciones. El resultado final de su evaluación terminó en un error. Su proceso de evaluación fue dado hasta donde se mostró el error y su tiempo fue de 14 segundos.

1) Proceso de evaluación

La evaluación se dio similar a la del caso de estudio, pero de la detección de los identificadores tuvo algunas dificultades y su emparejamiento se dio de forma errónea para algunas partes cómo se puede ver en la Fig. 16. En este proceso fue confundido el contenido del identificador 3 con el identificador 1. Esto se debió a que muchas de las partes de la imagen muestran distorsiones como la de la Fig. 17. Basado en estos resultados se puede deducir que la detección de los delimitadores de secciones es decisiva y debe manejarse con mucha cautela.

F. Pruebas de tiempo

Para evaluar la eficiencia del sistema en términos de tiempo, se emplearon pruebas donde se midió el tiempo de evaluación de cada modelo. Estas pruebas fueron dadas en cinco (5) iteraciones y con la misma instancia para cada modelo. De esta manera se da una evaluación con las mismas características sin alterar otros detalles.

Los resultados de estas pruebas se pueden visualizar en la Fig. 18. Donde se encuentra un patrón de proporción directa entre la complejidad del modelo del examen, a excepción del modelo "Normal", el cual obtuvo algunas décimas por arriba del modelo sucesor ("intermedio"). En general se obtuvo un promedio aproximadamente 13 segundos, lo cual se encuentra por debajo del rango aceptable de los 15 segundos, el cual es un tiempo razonable para evaluar una instancia de examen.

G. Discusión

Los resultados obtenidos en general son aceptables y demuestra un comportamiento esperado. Al compararse con otros softwares, hay aspectos comunes a los encontrados comercialmente.

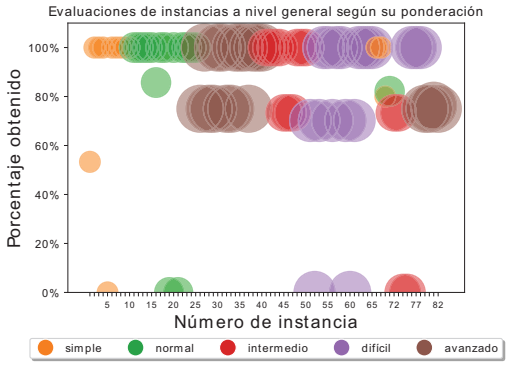


Fig. 11. En el gráfico, la instancia uno (1) posee un 50% de su evaluación. Donde el tamaño de la burbuja indica el impacto en la evaluación final.

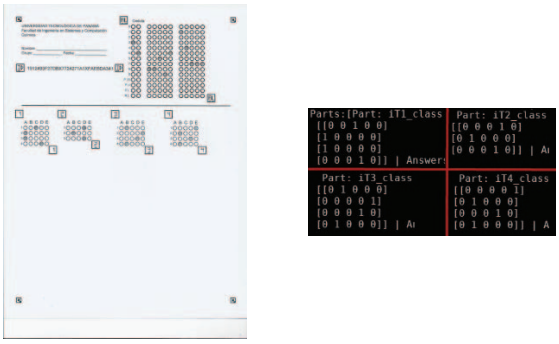
Con respecto a la eficiencia se puede decir que el tiempo del sistema (como en la sección de pruebas de tiempo) es mejorable. Sin embargo, esta comparativa no incluye el hecho de que hay un tiempo adicional en el cálculo de las secciones, característica que no todas las propuestas poseen.

En términos de desempeño del componente OMR o de extracción de marcas, demostró un rendimiento bastante alto. Esto es debido a la incorporación de un algoritmo inteligente de deducción de marcas. En las pruebas realizadas este componente no presentó dificultad ni problemas mayores, su único requisito era que las secciones fueran recortadas de forma correcta. En comparación a la forma tradicional [19], se presenta más robusta y hasta como una manera más reforzada de manejar algoritmos de OMR.

Para el caso de los softwares que manejan la evaluación integrada en la misma página de pregunta, la detección por secciones empleada en esta propuesta da la ventaja de simplificar el proceso y encontrar las secciones de una forma

Tabla 2 Accuracy promedio obtenidos por cada modelo de examen

Tipo de Examen	***Accuracy***
Simple	87.18%
Normal	85.49%
Intermedio	76.19%
Difícil	80.61%
Avanzado	86.91%
Promedio	***83.28%***



Ejemplar Detección

Fig. 13. Instancia número 7 junto con la detección dada por el sistema.

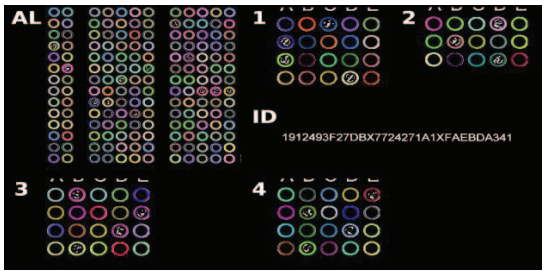


Fig. 14. Extracción de macas de cada parte o matriz del examen. Los colores son elegidos aleatoriamente para una mejor visualización.

más clara (cómo se puede observar en la Fig. 15). Esto es debido a que la agrupación de partes basados en exámenes puede presentar dificultades y si estos exámenes no son interpretados de forma correcta, pueden darse resultados inesperados.

Cabe mencionar también que en los casos que se presenta la confusión entre el indicador 3 e indicador 9, estos se deben a la similitud que pueden presentar estas marcas cuando son digitalizados y dentro de este proceso se dan distorsiones como en el caso de la Fig. 16.

IV. Conclusiones

A. Conclusión

Generalmente se buscaba crear un sistema útil para los docentes el cual se encargará de evaluar los exámenes académicos, dando las herramientas necesarias y específicas para cubrir esta necesidad. Este sistema se pudo elaborar incluyendo los objetivos propuestos y tomando toda la complejidad del proceso de evaluación de exámenes y simplificándolo en una aplicación web.

Específicamente esta herramienta se implementó enfocándose con la integración de técnicas de visión artificial e inteligencia artificial, tal como se había propuesto. Este punto se puede observar al tomar el componente de extracción de las secciones del examen y observar que la detección de formas cuadradas cooperara con la red neuronal para obtener recortes con una exactitud aceptable y útil.

Agregada a esta integración, el crear un conjunto de datos tanto para la identificación de los limitadores como para la detección de marcas, hizo que muchas tareas se facilitaran y dieran mejores resultados; en comparación de una forma programada manualmente. Donde este tipo de implementación hubiese sido una implementación más complicada y de difícil mantenimiento.

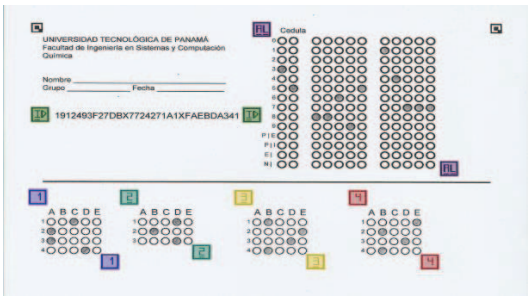


Fig. 15. Detección de identificadores y emparejamiento según su contenido

Adentrando más en la influencia de la inteligencia artificial en el sistema. Se pudo observar que la aplicación de técnicas de ML modulariza en cierto aspecto los procesos (Fig 14 y Fig. 15), lo cual permite optimizar unos de estos componentes. La aplicación de ML del componente OMR pudo demostrar una mejora muy alta al momento de evaluar las matrices de marcas de respuestas (Fig. 14).

Llegando a un punto más orientado a la visión artificial tradicional, a pesar de que los modelos de ML dieron al sistema un funcionamiento esperado. Se puede decir que la visión artificial dio el flujo base para el proceso evaluación de exámenes se diera en el orden estipulado.

Con estos puntos cubiertos, en síntesis, se puede decir que el desempeño del sistema obtenido (de más de un 83%), puede servir para el uso diario de los profesores en las tareas de calificación de exámenes individuales. La aplicación de la herramienta se puede dar en cursos normales de universidades y hasta colegios donde por lo general la mayoría de los grupos es similar a los de las universidades.

B. Ventajas

El sistema desarrollado presenta algunas características o agregados los cuales se pueden considerar como puntos que favorecen a la propuesta, entre estos se pueden mencionar:

- Integración del proceso de evaluación en un solo proceso.
- Herramienta orientada hacia docentes individuales.
- Interfaz de usuario simple y con la posibilidad de utilizarse en cualquier plataforma con un navegador web.
- Mejoras del proceso de OMR utilizando algoritmos más avanzados como K-means y SVM.
- Propuesta de código abierto y sin suscripciones.

C. Trabajo futuro

Algunos puntos detectados durante las pruebas fueron considerados como mejoras futuras que pueden llegar a darse en próximas iteraciones del sistema. De estas se pueden mencionar:

- Mejoras en los recortes de las matrices, utilizando recortes de áreas de interés más flexibles.
- Integración a plataformas de calificación y registros de notas.
- Manejo de cantidad variable de opciones.

Fig. 16. Identificadores con distorsiones. Nótese como el contenido pierde significado al verse desplazado como en la imagen.

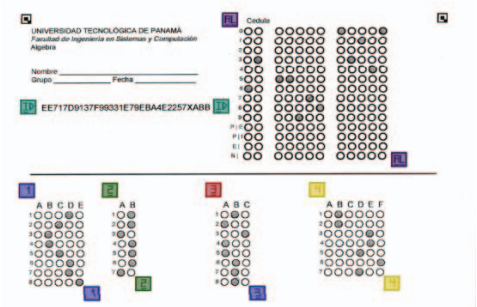


Fig. 17. Emparejamiento de los identificadores para el caso de fallo. Nótese como un identificador 3 fue detectado como 1.

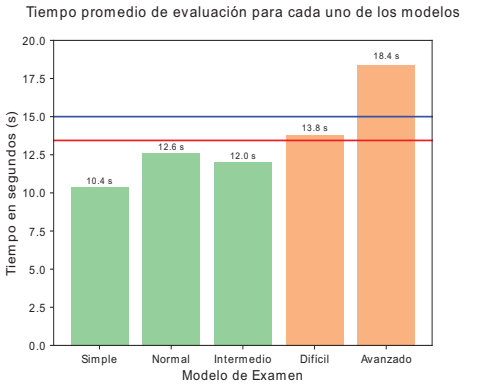


Fig. 18. Tiempo promedio tomado por cada modelo de examen. La línea roja es el promedio entre los modelos y la azul el tiempo aceptable para evaluación.

AGRADECIMIENTOS

A Rolando A. Rosales J. por brindar algunos recursos utilizados en el proyecto, como las fuentes de los delimitadores de secciones del examen. A Erika Jordán, por el apoyo en algunos aspectos del proyecto. A la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), por la guía y apoyo general en el desarrollo. Al Sistema Nacional de Investigación (SNI) del SENACYT, por brindar apoyo en fondos para el proyecto.

REFERENCIAS

[1] Universidad Tecnológica de Panamá, "Estadísticas - Transparencia (Mátricula y otros números)," January 2019. [Online]. Available: http://www.utp.ac.pa/estadisticas-transparencia. [Accessed 25 January 2019].

[2] T. Jabbarifar, "The importance of assessment and evaluation in educational system," in *International Conference of Teaching and Learning (ICTL 2009)*, Malaysia, 2009.

[3] F. Sempere Ferre, "Kahoot como herramienta de autoevaluación en la universidad," in *N-RED 2018: IV Congreso Nacional de Innovación Educativa y Docencia en Red*, Valencia, 2018.

[4] E. Castillo García, L. Ibáñez Torres, G. León Bello, M. A. Sanahuja Santafé, V. Villagrasa Sebastián and I. Martínez Solís, "ZIPGRADE : herramienta para corrección de cuestionarios de evaluación y análisis de resultados," in *IN-RED 2019: V Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red*, Valencia, 2019.

[5] 50Minutos.es, El modelo Freemium: Cómo atraer clientes de forma masiva, 1 ed., , 2016, p. 33.

[6] R. Wynn, "Optical Mark Recognition," *Data Processing,* vol. 26, no. 9, pp. 26-27, 1984.

[7] J. Memon, M. Sami, R. A. Khan and M. Uddin, "Handwritten Optical Character Recognition (OCR): A Comprehensive Systematic Literature Review," *IEEE Access,* vol. 8, pp. 142642-142668, June 2020.

[8] A. Briceño, "La educación y su efecto en la formación de capital humano y en el desarrollo económico de los países," *CENES,* vol. 30, no. 51, pp. 45-59, 2011.

[9] A. Gonzalez, "Indicadores del rendimiento escolar : relación entre pruebas objetivas y calificaciones," *Revista de educación,* no. 287, pp. 31-54, September 1988.

[10] R. H. Sampieri, C. F. Collado and M. d. P. B. Lucio, Metodología de la investigación (6a. ed.)., McGraw-Hill Interamericana, 2000.

[11] J. Arnowitz, M. Arent y N. Berger, Effective Prototyping for Software Makers, Elsevier Science, 2010.

[12] E. Hossain, M. A. Babar and H.-y. Paik, "Using Scrum in Global Software Development: A Systematic Literature Review," in *2009 Fourth IEEE International Conference on Global Software Engineering*, Limerick, 2009.

[13] V. Aggarwal and A. Singhal, "Empirical Study of Test Driven Development with Scrum," in *International Conference on Advances in Computing and Data Sciences*, Singapore, 2019.

[14] S. Brown, C4 Model, 1 ed., Leanpub, 2021, p. 106.

[15] A. Geron, Hands-On Machine Learning with SciKit-Learn & TensorFlow, O'Reilly, Ed., 2019.

[16] M. Kuhn and K. Johnson, Applied predictive modeling, Springer, 2013.

[17] E. R. Davies, Machine vision: theory, algorithms, practicalities, 5 ed., Elsevier, 2017, p. 900.

[18] A. Rosebrock, «Deep Learning for Computer Vision with Python,» vol. 1, PyImageSearch, 2017, p. 323.

[19] A. Rosebrock, "Bubble sheet multiple choice scanner and test grader using OMR, Python and OpenCV," October 2016. [Online]. Available: https://www.pyimagesearch.com/2016/10/03/bubble-sheet-multiple-choice-scanner-and-test-grader-using-omr-python-and-opencv/. [Accessed 28 April 2019].

Partial discharge detection in power lines using automated machine learning

Jannery Rivas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama City, Panama
jannery.rivas@utp.ac.pa

Carlos Boya-Lara
Laboratorio de Ensayos Eléctricos de Alta Tensión (LEEAT)
Universidad Interamericana de Panamá
Panama City, Panama
carlos.boya@uip.pa

Héctor Poveda
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama City, Panama
hector.poveda@utp.ac.pa

***Abstract*—Electrical grids must be reliable, and maintenance plays a vital role in this matter. A common application of artificial intelligence in the industrial sector is predictive maintenance, alongside condition monitoring. In power systems, this means that maintenance can be scheduled for the right time so electrical faults can be avoided before they occur. In this way, to evaluate the health of insulation in power systems, partial discharges (PD) are used as indicators of insulation degradation in electrical equipment. Detecting a PD at an early stage can prevent catastrophic consequences. Machine learning (ML) and deep learning (DL) techniques have been used in PD diagnostics for detection, localization, and recognition. Domain knowledge on the matter improves feature engineering, but manually creating pipelines for ML models is a tedious task. DL is being used to not depend on human expertise, but these models are hard to configure. On the other hand, automated machine learning (AutoML) allows domain experts to implement robust ML models without having a background on statistics and ML. However, AutoML has not been widely addressed in the scope of PD diagnostics. For this reason, in this paper AutoML is used for the detection of PD faults. A public dataset of PD measurements on covered conductors from power lines is used to implement models using AutoML. The data was preprocessed, and several models were developed using various resampling techniques. An AutoML model with no resampling technique consisting of multiple algorithms obtained the best results, outperforming a LightGBM model.**

Keywords—partial discharge, detection, machine learning, AutoML, power lines

I. Introduction

One of the most important aspects for the performance of the grid is the reliable supply of electrical energy to households, industries, and other sectors. New technologies and tools allow us to detect faults before they happen, so there is an increase in the reliability of the grid [1]. Maintenance is an important task to guarantee a better performance of the grid. In general, there are three strategies for maintaining industrial equipment: reactive, preventive, and predictive maintenance (PdM). The latter combines condition monitoring, system efficiency, and other indicators to identify failures or loss of efficiency in the future. PdM is currently one of the most common application of artificial intelligence in the industrial sector [2]. Scheduling maintenance tasks help prevent possible failures by taking early action with the purpose of avoiding electric supply disruption [3].

The electric grid reliability directly depends on the electrical insulation of the components, which should continuously be monitored to prevent power disturbances such as dips, interruptions, and outages [4]. Nowadays, with the increasing presence of smart grid technologies, smart diagnosis implementation allows to mitigate or avoid these risks [5]. One of the most important techniques for diagnostics are those based on Partial Discharge (PD) measurements [6], which have successfully been applied on electrical machines such as transformers, rotating machines, power line cables, and Gas Insulated Switchgear (GIS) [5]. PD is an electrical discharge that occurs across a portion of the insulation between two conductors, without completely bridging the conductors [7]. They are low-energy electric discharges localized in insulation with a short duration (less than a microsecond) [8]. However, their repeated action alters dielectric properties and can produce total failure [9]. This phenomenon damages the insulation system and in long-term causes failures in electrical components by insulation aging. These failures need costly and time-consuming repairs [10]. Several approaches have been proposed to make the electrical equipment smarter. One of the prerequisites of the smart equipment is reliable health monitoring system [11]. Therefore, PD should be continuously monitored [6] because it is an important preventive tool to safeguard the high voltage equipment from damage [12] [13].

Nowadays, automatic detection of PD is possible largely due to advances in sensing technology and data driven techniques [14]. Typically, a PD monitoring system consists of two components: a PD signal measurement module and a data analysis module. Because PD emits energy in several ways, they can be measured by various sensors that detect current signals, electromagnetic radiation, light, heat, or acoustic signal [8]. On the other hand, the data analysis module is focused on processing the measured signals by reducing noise, extracting, reducing and selecting features, and classifying or recognizing the signals [7].

PD signals can be represented using two different patterns: time-resolved, and phase-resolved patterns. Features can be obtained directly from the patterns, but they can also be generated by dimensionality reduction techniques [7]. Traditionally, PD diagnostics are mainly based on handcrafted features extracted by conventional feature extraction techniques. Some advanced signal processing techniques are developed to extract more sophisticated and powerful features [6] [15]. These features are used as input for machine learning (ML) models [16]. However, manually creating pipelines consisting of preprocessing and learning algorithms, alongside the hyperparameters, is both a tedious and time-consuming task [2]. It requires a lot of effort and expertise. Conventional ML methods are employed for classification and regression tasks. Some of these methods are artificial neural network (ANN), support vector machine (SVM), ensembles of decision trees, and fuzzy inference system (FIS) [6].

This work was made possible thanks to the support of the Sistema Nacional de Investigación (SNI) of SENACYT, Panama.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00041

Recently, with advances in computing power, deep learning (DL) has been receiving increasing attention for intelligent PD diagnostics [14]. With deeper structures, DL models are capable of extracting features from input data and achieving more reliable and accurate results. DL has shown to obtain better performance than traditional ML techniques and do not depend on human feature extraction. However, DL comes at the cost of more computing power, need larger datasets to train, are harder to configure [17], and are a black box. On the other hand, traditional ML techniques heavily depend on domain expertise for feature engineering, but they are easier to implement, get better performance than DL with smaller datasets [6], and can generally be more interpretable.

In order to make ML techniques easier to apply and to reduce the demand of human experts, and to build ML applications automatically without extensive knowledge on statistics and ML, Automated Machine Learning (AutoML) has emerged as a growing field that automatically select, compose and parametrize machine learning models, with the purpose of achieving optimal performance on a given task or dataset [18].

As AutoML has not been addressed in the scope of PD diagnostics, in this paper it is studied the implementation of AutoML to detect PD on covered conductors (CC) used in medium voltage overhead power lines. The VSB Power Line Fault Detection [19] public dataset is used, which includes signals with PD or without PD. The objective of this paper is to evaluate several AutoML models and to compare them with a LightGBM model, which was the top performing model for the dataset [20]. The contributions of this paper are the following:

- AutoML is used for PD detection, which is neither traditional ML nor DL.
- Effects of resampling techniques alongside AutoML for PD detection are shown and discussed.
- Real-world data is used for the models.

The rest of this paper is organized as follows: in Section II the challenges of detecting PD is commented, in Section III AutoML is described in more detail, Section IV shows the methodology used for the experiments, in Section V the results are presented and compared, in Section VI the results are discussed, and in Section VII conclusions and future work is drawn.

II. Partial Discharges in Covered Conductors

Aerial covered conductors (CC) have been increasingly used in many places around the world because of unique advantages. For example, CC can reduce the chance of fault caused by tree branch hitting the conductors or by wildlife animals. However, the detection of phase-to-ground faults based on overcurrent detection is not possible on CC, which is the ordinary protection device used for bare conductors. PD is widely accepted as a type of alternative signature in such applications, rather than the traditional overcurrent signature [21]. In case of medium voltage overhead lines with CC, the internal PD indicate the degradation of the insulation system, rupture, or downfall of the line [16].

Devices that measure PD can be attached to the CC from power lines [21]. The data obtained by meters can be used to make predictions about the health state of the system. This information can be used to schedule maintenance in advance of predicted failure. ML can use that data to make predictions. ML has the advantage that it can work without domain knowledge if enough data is available. The major drawback is that it is rare to obtain data that covers all possible outcomes. Human expertise can and must improve a ML approach and reduce the required amount of data through feature engineering [2].

The raw signals from a real power line contain several sources of background noise: discrete spectral interference DSI (radio emissions), repetitive pulses interference (power electronics), random pulses interference RPI (lightning, switching operations, corona), and ambient and amplifier noise [22]. Long-wave transmitters are the most significant permanent source of noise and corona discharges create false hit peaks in a time domain of a signal that can be misdetected as PD-pattern [1]. At last, the signal consists of relevant and irrelevant (false hits) peaks [16]. An accurate CC fault detection is conditioned by the accurate classification of PD-pattern and elimination of false pulses [23]. Fig. 1 shows a section of a signal where the PD pattern and background noise is identified. The signals were obtained by [16] and can be found in the public dataset [19]. RPI creates false pulses that can be noticed in the time domain of the signal and may be mistaken as a PD. However, the number of peaks is less than that of the PD pattern and the amplitude is bigger. Also, DSI can be present throughout the signal.

The noise makes the detection of PD a challenging task, as this degrades the quality of the data being used in ML models. Because of this, Misak et al. [16] noticed that the number of peaks and the features derived from the detected peaks are the most relevant features out of all the features evaluated. This is considered when selecting the features for the models implemented in this paper.

III. Automated Machine Learning

Building well performing ML applications requires highly specialized data scientists and domain experts [24]. Developing good models from a dataset involves intuition, experience, and many tedious manual tasks to tune algorithmic parameters [25]. AutoML has appeared as a new sub-area in ML and it has got more attention not only in ML but also in computer vision, data mining and natural language processing. It has already been successfully applied in

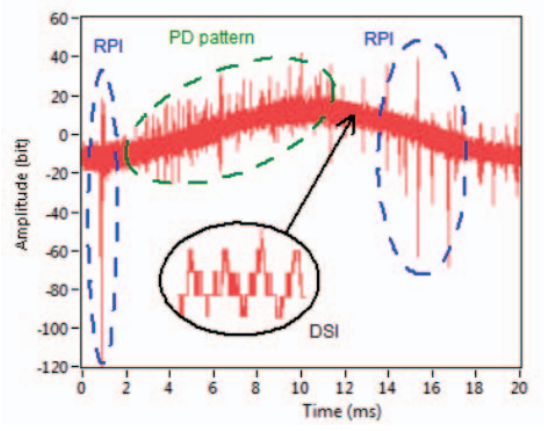


Fig. 1. PD-pattern with noise during CC fault [16]. Random Pulses Interference (RPI) and Discrete Spectral Interference (DSI) are the type of background noise in the signal.

important problems such as automated model selection, neural network architecture search, and automated feature engineering [17].

AutoML emphasizes on how conventional ML can be used and controlled. The goal of AutoML is to construct high-level controlling approaches over conventional algorithms so that configurations can be found by computer programs. In conventional ML, humans are heavily involved in configuring learning tools by operating feature engineering, model selection and algorithm selection. As a result, humans take the most labor and knowledge-intensive job in ML practices. However, in AutoML, all these can be done by computer programs. AutoML has 3 main goals: (1) good performance, (2) less assistance from humans, and (3) high computational efficiency [17]. Extracted features are used to train many different types of models, each with many different sets of parameters. Then, the best model (or ensemble of models) is selected as the final model [25]. AutoML has now become one of the most relevant research topics not only in academia but also in the industry [26]. There are several AutoML tools such as Auto-sklearn, TPOT, Darwin, Auto-WEKA, Auto-Keras, Google Cloud AutoML, Microsoft AzureML, and others. They have different approaches for model selection and hyperparameter optimization.

Auto-sklearn is the AutoML tool used in this paper. It frees the ML user from algorithm selection and hyperparameter tuning. It leverages from recent advantages in Bayesian optimization, meta-learning and ensemble construction. Auto-sklearn includes 15 classification algorithms of different categories such as general linear models, support vector machines, discriminant analysis, nearest neighbors, naïve Bayes, decision trees and ensembles. It also includes data preprocessors (which change the feature values and are always used when they apply) and feature preprocessors (which change the actual set of features, and only one of which is used, or none) [27].

IV. Methodology

The methodology followed in this paper can be divided in three major sections. First, the nature of the data is explained, and the preprocessing steps are presented. Then, implemented models are described in the next section. Finally, metrics used to evaluate the models are presented in the metrics section.

A. Dataset

The data was extracted from Kaggle (VSB Power Line Fault Detection) [19]. The original data consisted of a metadata file and a parquet file describing the signals from a grid with a 3-phase power scheme.

The metadata included:

- Measurement ID: Unique code for a trio of signals recorded at the same time. There was a total of 2904 measurements.
- Signal ID: Unique code for each signal recorded. There was a total of 8712 signals.
- Phase of the signal: The phase to which each signal in the trio belongs to. The phases identify as 0, 1 or 2.
- Target: 0 if the power line has no fault, and 1 if there is a fault.

The parquet file included the train data. There was a total of 8712 columns, one column for each signal. Each column contained 800,000 measurements of a power line's voltage, taken over 20 ms. The electric grid where the signals were taken was 50 Hz, so each signal covers a single complete grid cycle. Fig. 2 shows an example of a signal without PD (no fault), whereas Fig. 3 shows a signal with PD (fault). The three phases can be seen for both cases. Notice the signals contain noise and that the vertical axis in both figures do not have the same scale. Both signals were extracted from the dataset.

The signals were denoised and processed following the methodology as in [20]. The steps performed to do the preprocessing are:

- Flatten the signal using a notching filter centered in 50 Hz to remove the sine signal from the grid.
- Identify the local maxima peaks in each signal.
- Filter the peaks identified previously to separate the signal from the noise.
- Calculate features for each peak identified in the previous step.

Once all the peaks in a signal have been identified, the peaks caused by the noise in the signal need to be removed. This is done by ordering the peaks by their height, calculating the gradient between each consecutive pair of peaks, smoothing the gradients using a convolution operation and finding the noise floor. When the noisy peaks have been removed, features are calculated for each of the remaining peaks. Fig. 4 shows the preprocessing steps.

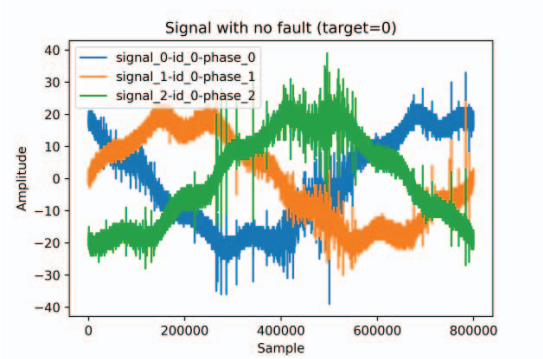


Fig. 2. Raw signal with no fault.

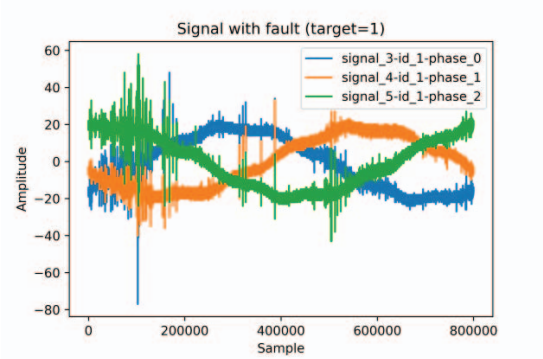


Fig. 3. Raw signal with fault.

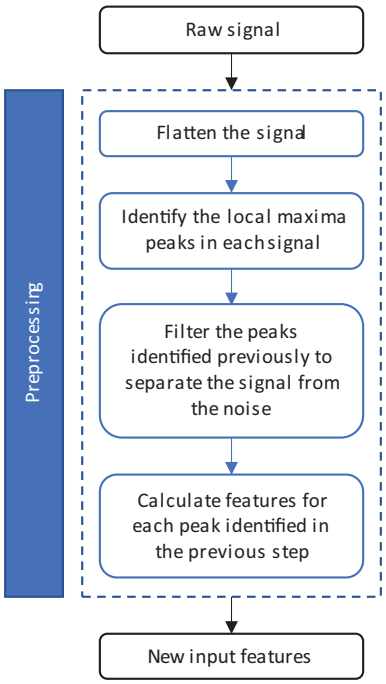


Fig. 4. Steps for preprocessing raw signals.

The dataset used to train the models implemented in this paper have 9 features with 2904 samples, which corresponds to the total measurements done by the meter, combining the trio of signals. All the features are related to the peaks in the signals. Final features are: quantity of peaks in quadrant 1 and 3, mean absolute smallest distance to minimum peak in quadrant 0 and 2, mean height in quadrant 0 and 2, standard deviation in height in quadrant 0 and 2, mean of root mean squared error of sawtooth in quadrant 0 and 2, quantity of peaks in quadrant 0 and 2, mean ratio to next peak in quadrant 0 and 2, mean ratio to previous peak in quadrant 0 and 2, and total quantity of peaks.

This dataset is imbalanced, as can be seen from Fig. 5. 2710 out of 2904 samples have a target of no fault, while the other 194 samples have a target of fault. This means the majority class is the no fault class with a presence of 93.32%, while the minority class is the fault class with the 6.68%. The imbalance ratio in this dataset is 14:1, which is not severely imbalanced.

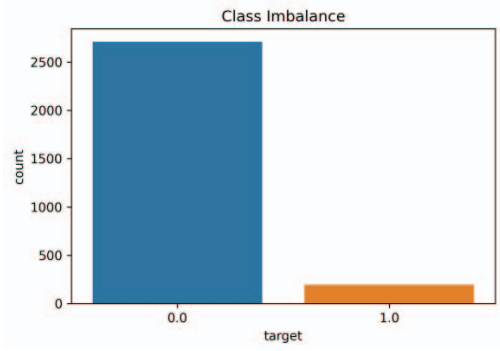


Fig. 5. Class imbalance in full dataset.

The dataset was divided in a training and a testing set. A ratio of 85:15 was selected to divide the training and testing dataset, respectively. The division was done by shuffling the data and maintaining the distribution of classes in both the training and test dataset. Fig. 6. shows the distribution of classes on both training and testing dataset.

B. Models

To assess the performance of the AutoML models, a LightGBM model was implemented to use as a reference and compare the results. This was the algorithm used by the top place for the dataset from VSB [19][20]. Performance of AutoML models is compared against the top Kaggle human solutions [28] as in [29].

1) LightGBM: The configuration of the model is the same as [20]. The training dataset was used for training and the performance was measured with the testing dataset. The best probability threshold was selected using the test dataset.

2) AutoML: For the AutoML models different resampling techniques were applied to observe the effect of altering the class distribution and determine which technique may improve the results. This resampling was only applied to the training dataset. These techniques were applied to tackle the imbalance problem in the dataset.

Auto-sklearn is used as the tool for AutoML, as it is robust and performs better than other tools such as TPOT, Ludwig, Darwin and Auto-ml [25].

A total of 5 different resampling techniques were applied:

a) No resampling: The class distribution remained the same. No resampling technique was applied.

b) Undersampling: The majority class was reduced to have the same number of samples as the minority class, both with 165 samples each. Random samples from the majority class were removed from the training set.

c) Oversampling: The minority class was incremented to have the same number of samples as the majority class, both with 2303 samples each. Random samples from the minority class were duplicated.

d) Combining techniques: Oversampling and undersampling were combined. The order in which each technique is applied is important, so both cases were tested.

- *Oversampling and Undersampling:* First, the oversampling technique is applied so the minority class (575 samples) is a 25% of the majority class (2303 samples). Then, the undersampling technique is applied so the minority class (575 samples) is the 50% of the majority class (1150 samples).
- *Undersampling and Oversampling:* First, the undersampling technique is applied so the minority class (165 samples) is the 25% of the majority class (660 samples). Then, the oversampling technique is applied so the minority class (330 samples) is the 50% of the majority class (660 samples).

The algorithm looks for the best combination of ML techniques to get the best results for the dataset being used. However, the results obtained by using only one algorithm should also be evaluated. That's why, alongside each

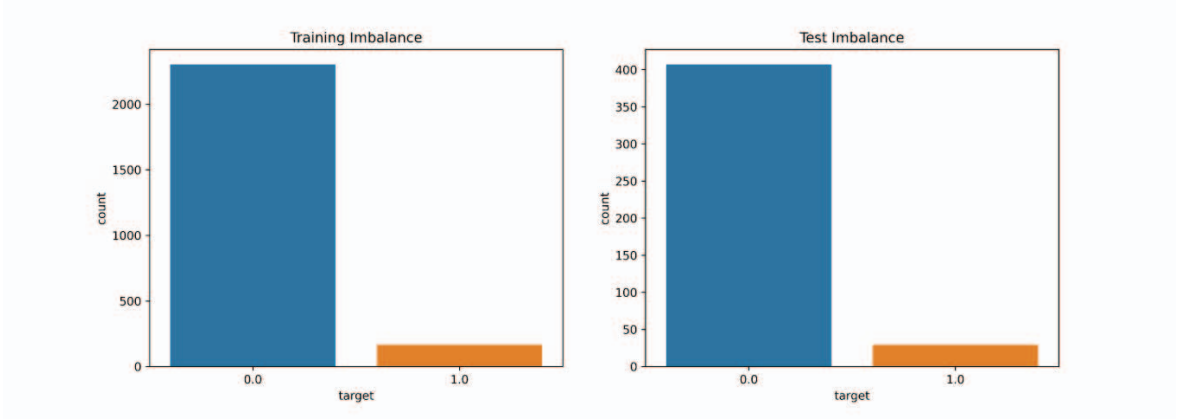


Fig. 6. Class imbalance in training and testing dataset. Both datasets have the same distribution.

resampling technique, two models were implemented for every version:

- *Multiple ensemble:* The ensemble size was set to the default size of 50, so the maximum number of algorithms to constitute the final model can't be more of 50.
- *Single ensemble:* The ensemble size was set to 1, so only one algorithm was used to make predictions.

All the hyperparameters were selected by the algorithm. The metric used for the training of the model was the accuracy. Other metrics such as balanced accuracy, F1 score and Matthews correlation coefficient (MCC) were tried, but the accuracy allowed the algorithm to obtain the best results. The modeling process is shown in Fig. 7.

The AutoML algorithm was internally trained using 67% of the training data and the other 33% was used as validation set to find the best model.

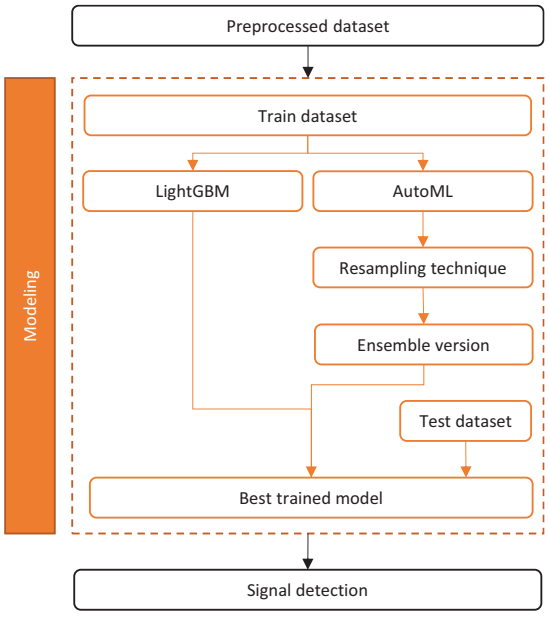


Fig. 7. Process for modeling.

For all AutoML models, the maximum time set to find the best results were 20 minutes. The maximum time set for evaluating the performance of each individual algorithm was 5 minutes.

C. Metrics

The Matthews correlation coefficient (MCC) between the observed and predicted response was the metric used in [20]. This metric is also used to evaluate the performance of the models implemented in this paper. The MCC is given by (1).

$$MCC = \frac{(TP \cdot TN) - (FP \cdot FN)}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (1)$$

Where TP is the number of true positives, TN is the number of true negatives, FP is the number of false positives, and FN is the number of false negatives.

MCC is a robust metric that summarizes the classifier performance in a single value. It also is a great metric when both positive and negative cases are of equal importance [30]. This applies to the case of PD detection. The MCC score has a range of -1 to +1, where +1 means perfect prediction, 0 means an average random prediction, and -1 means an inverse prediction.

The Brier Score (BS) was also used to measure the performance of the best models. The score equals the mean squared error of prediction, given by (2). A lower BS indicates greater accuracy. This score can be used to measure how confident the model is by making the predictions.

$$BS = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(f_t - o_t)^2 \quad (2)$$

Where N is the total observations, t is the observation being evaluated, f_t is the probability forecasted for the observation t, and o_t is the outcome of the observation t (0 or 1).

There is also the Brier Skill Score (BSS) given by (3). This score reflects the relative performance of one Brier score (BS_f) over another Brier score (BS_{ref}). A negative result means the performance of the reference is better, a positive result indicates the performance of the reference is worse, a result of 0 means that the alternative model and the reference have the

same performance, and a result of 1 indicates that the alternative model has a perfect prediction. The greater the score, the better.

$$BSS = 1 - \frac{BS_f}{BS_{ref}} \quad (3)$$

V. Results

First, reference results using LightGBM are presented. Then, AutoML results are presented.

A. LightGBM

The best probability threshold was 0.7. This threshold allowed to obtain the algorithm the highest MCC test score of 0.70. The BS obtained was 0.0372.

B. AutoML

Alternatively, AutoML results were obtained using 5 different resampling techniques and implementing 2 different models for each resampling technique. In total, 10 different models using AutoML were implemented.

1) No resampling: No resampling technique was used for these models. The class imbalance stayed the same.

a) Multiple ensemble: A total of 22 algorithms were used in the final trained model. The training accuracy was 0.97 and the test accuracy was also 0.97. The MCC test score was 0.77.

b) Single ensemble: Only one algorithm was used in the final trained model. The training accuracy was 0.96 and the test accuracy was also 0.96. The MCC test score was 0.70.

2) Undersampling: The resampling technique used in these models was the undersampling technique. The total samples used in the training dataset were 165 samples each for both the majority and minority class.

a) Multiple ensemble: A total of 18 algorithms were used in the final trained model. The training accuracy was 0.94 and the test accuracy was 0.91. The MCC test score was 0.58.

b) Single ensemble: Only one algorithm was used in the final trained model. The training accuracy was 0.93 and the test accuracy was 0.90. The MCC test score was 0.55.

3) Oversampling: The resampling technique used in these models was the oversampling technique. The total samples used in the training dataset were 2303 samples each for both the majority and minority class.

a) Multiple ensemble: A total of 9 algorithms were used in the final trained model. The training accuracy was 0.999 and the test accuracy was 0.96. The MCC test score was 0.63.

b) Single ensemble: Only one algorithm was used in the final trained model. The training accuracy was 0.99 and the test accuracy was 0.96. The MCC test score was 0.72.

4) Combining techniques: The following models were implemented using both oversampling and undersampling. The distribution in which the oversampling and undersampling was applied is in a 1:2 ratio.

a) Oversampling and Undersampling: First, the oversampling technique was applied, followed by the undersampling technique.

Multiple ensemble: A total of 22 algorithms were used in the final trained model. The training accuracy was 0.98 and the test accuracy was 0.96. The MCC test score was 0.68.

Single ensemble: Only one algorithm was used in the final trained model. The training accuracy was 0.98 and the training accuracy was 0.96. The MCC test score was 0.68.

b) Undersampling and Oversampling: First, the undersampling technique was applied, followed by the oversampling technique.

Multiple ensemble: A total of 19 algorithms were used in the final trained model. The training accuracy was 0.97 and the test accuracy was 0.93. The MCC test score was 0.61.

Single ensemble: Only one algorithm was used in the final trained model. The training accuracy was 0.97 and the test accuracy was 0.94. The MCC test score was 0.62.

All MCC test scores are showed in Table I. The rank of each model can also be seen. Results in bold indicate the best results.

TABLE I. MCC Test Scores For All Models

Model				MCC	Rank
LightGBM				0.70	3
AutoML	**No resampling**		**Multiple**	**0.77**	**1**
			Single	0.70	3
	Undersampling		Multiple	0.58	8
			Single	0.55	9
	Oversampling		Multiple	0.63	5
			Single	0.72	2
	Combining techniques	Over and Under	Multiple	0.68	4
			Single	0.68	4
		Under and Over	Multiple	0.61	7
			Single	0.62	6

The model with the best performance was the AutoML model with no resampling technique and multiple ensemble.

The BS was calculated for the LightGBM model and the best performing AutoML model. The score can take values between 0 and 1. The smaller the score, the better. The score for the LightGBM model was 0.0372 and the score for the AutoML model was 0.0252.

The BSS obtained was 0.32 for the best performing AutoML model.

VI. Discussion

LightGBM model had a similar result as [20]. This means that this model can be used fairly to make comparisons with the AutoML models implemented in this paper. Notice that the best probability threshold was different than the original and it was adapted so it can still produce the best MCC results this algorithm can get.

Only two AutoML models had better results than the LightGBM model, and one other had the same performance. This shows that these algorithms learned well the patterns of the data and could be used to detect PD in power lines. It's important to notice that running the AutoML algorithm for a larger time could improve overall results.

The AutoML model with no resampling showed better performance than the other models where the resampling techniques were applied. Also, notice that the multiple

ensemble version obtained better results compared to the single ensemble version. This is no surprise as the multiple ensemble model included 22 total algorithms. Also, there was no overfitting in both multiple and single version as the accuracy score on both training and testing remained the same. Overall, applying no resampling technique allowed to obtain an AutoML model that captures really well the patterns in the data. The MCC test score was of 0.77, which is considerably higher than the LightGBM model. Testing data used in this paper respected the distribution of the training data, so it can be inferred that the testing data in [19] also had a similar distribution and therefore AutoML results are promising.

The second-best performing model was the AutoML model with the oversampling technique and the single ensemble version. This model outperformed the multiple ensemble version, therefore the single ensemble model generalized better than the multiple ensemble model. It is important to remember that the algorithm chooses the best algorithm and the best hyperparameters to get the best results.

Applying the undersampling technique showed the worst results. This may be because the total number of samples used to train the models was not enough. The models, both on the multiple and single ensemble version, didn't capture correctly the patterns in the data compared to other models with other resampling techniques.

The same could be said to the models where the techniques were combined, but the undersampling was applied before the oversample. The total number of samples wasn't enough for the models to learn the patterns in the data. However, the models where the oversampling was applied before the undersampling showed relatively good results by being the 4th best models, both on the multiple and single ensemble. Both versions showed similar results in all aspects.

Notice that the multiple ensemble version allowed to get the best results. However, out of 5 experiments, in 2 of them the multiple ensemble showed better performance than the single ensemble, in other 2 experiments the multiple was worse than the single ensemble, and in the other experiment both the multiple and single got the same results. This shows that using more ML techniques doesn't necessarily produce better results as just using one algorithm.

The BS calculated for the LightGBM model and the best AutoML model shows that the AutoML model is more confident in the predicted results. This means that the probabilities obtained were closer to the targets (0 or 1). However, both models showed small loses. It is important to mention that in the PD detection implemented in this paper the target was to determine if there is or there is not a fault, so the probabilities weren't a priority. Still, this metric gives more information on the models implemented.

The BSS also let us compare the reference model and the AutoML model, showing that there was a an improvement on the alternative model.

The effects of various resampling techniques could be seen in the results, compared with other papers were only one technique was applied. AutoML showed to produce a great performance without applying any resampling technique, meanwhile oversampling was necessary to improve the performance of a DL model. The use of this technique was especially important to avoid bias towards non-PD signals in [21].

Lastly, the LightGBM algorithm is a type of gradient booster not included in this paper's AutoML tool. However, in future works other estimators and feature processing methods can be added, which could improve even more the performance of the model.

VII. Conclusion and Future Work

AutoML was used to implement models that can detect if there is a PD fault or not. Several models were implemented using various resampling techniques to tackle the imbalance dataset problem, such as oversampling, undersampling, and a combination of both. The AutoML model outperformed a LightGBM model, which was the top performing model for the dataset used in this paper. The best AutoML model used no resampling technique and used an ensemble of 22 algorithms.

Results cannot be fully compared with other similar models as the exact dataset of training and testing data are not the same. Yet, the results obtained by the AutoML model are promising and may be comparable with DL models. However, feature engineering and human expertise are required. AutoML with raw data is yet to be addressed, although more computing power is needed.

The models were evaluated using the MCC score, which provides more information of model performance through a single value compared with other common metrics such as accuracy, precision, recall and F1-measure. Other researchers in the area are recommended to use the MCC score to better compare different algorithms and models. BS and BSS were also calculated to measure model performance.

In the future, noise reduction and feature engineering will be further researched with the purpose of improving the results obtained in the models implemented in this research. In addition, other estimators could be included and other AutoML tools should be compared. Anomaly-based methods will also be addressed and compared as it shows promising results.

References

[1] T. Vantuch, "Analysis of time series data", Ph.D. dissertation, Technical University of Ostrava, Ostrava, 2018.

[2] M. W. Hoffmann et al., "Integration of Novel Sensors and Machine Learning for Predictive Maintenance in Medium Voltage Switchgear to Enable the Energy and Mobility Revolutions", Sensors, vol. 20, n.º 7, p. 2099, 2020.

[3] M. R. Hussain, S. S. Refaat and H. Abu-Rub, "Overview and Partial Discharge Analysis of Power Transformers: A Literature Review", IEEE Access, vol. 9, pp. 64587–64605, 2021.

[4] S. Khokhar, A. A. B. Mohd Zin, A. S. B. Mokhtar and M. Pesaran, "A comprehensive overview on signal processing and artificial intelligence techniques applications in classification of power quality disturbances", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 51, pp. 1650–1663, 2015.

[5] S. Barrios, D. Buldain, M. P. Comech, I. Gilbert and I. Orue, "Partial Discharge Classification Using Deep Learning Methods—Survey of Recent Progress", Energies, vol. 12, n.º 13, p. 2485, 2019.

[6] S. Lu, H. Chai, A. Sahoo and B. T. Phung, "Condition Monitoring Based on Partial Discharge Diagnostics Using Machine Learning Methods: A Comprehensive State-of-the-Art Review", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 27, n.º 6, pp. 1861–1888, 2020.

[7] M. Wu, H. Cao, J. Cao, H. L. Nguyen, J. B. Gomes and S. P. Krishnaswamy, "An Overview of State-of-the-Art Partial Discharge Analysis Techniques for Condition Monitoring", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 31, n.º 6, pp. 22–35, 2015.

[8] "IEC 60270:2000", 2000, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.

[9] K. Temmen, "Evaluation of surface changes in flat cavities due to ageing by means of phase-angle resolved partial discharge measurement", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 33, n.º 6, pp. 603–608, 2000.

[10] H. D. Ilkhechi, M. H. Samimi and R. Yousefvand, "Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 113, pp. 906–915, 2019.

[11] L. Duan, J. Hu, G. Zhao, K. Chen, J. He and S. X. Wang, "Identification of Partial Discharge Defects Based on Deep Learning Method", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, n.º 4, pp. 1557–1568, 2019.

[12] C. Boya, M. Ruiz-Llata, J. Posada and J. A. Garcia-Souto, "Identification of multiple partial discharge sources using acoustic emission technique and blind source separation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, n.º 3, pp. 1663–1673, 2015.

[13] R. Bartnikas, "Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, n.º 5, pp. 763–808, 2002.

[14] X. Peng et al., "A Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Methodology for Recognition of Partial Discharge Patterns from High-Voltage Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, n.º 4, pp. 1460–1469, 2019.

[15] J. A. Ardila-Rey, M. P. Cerda-Luna, R. A. Rozas-Valderrama, B. A. D. Castro, A. L. Andreoli and F. Muhammad-Sukki, "Separation Techniques of Partial Discharges and Electrical Noise Sources: A Review of Recent Progress", IEEE Access, vol. 8, pp. 199449–199461, 2020.

[16] S. Misák, J. Fulnecek, T. Vantuch, T. Buriánek and T. Jezowicz, "A complex classification approach of partial discharges from covered conductors in real environment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, n.º 2, pp. 1097–1104, 2017.

[17] Q. Yao et al. "Taking Human out of Learning Applications: A Survey on Automated Machine Learning." https://arxiv.org/pdf/1810.13306.pdf (accessed Jul. 19, 2022).

[18] J. Waring, C. Lindvall, and R. Umeton, "Automated machine learning: Review of the state-of-the-art and opportunities for healthcare," Artificial Intelligence in Medicine, vol. 104, p. 101822, 2020.

[19] "VSB Power Line Fault Detection." Kaggle. https://www.kaggle.com/competitions/vsb-power-line-fault-detection (accessed Jun. 30, 2022).

[20] "VSB_1st_place_solution." Kaggle. https://www.kaggle.com/code/mark4h/vsb-1st-place-solution/notebook (accessed Jun. 30, 2022).

[21] M. Dong and J. Sun, "Partial discharge detection on aerial covered conductors using time-series," Electric Power Systems Research, vol. 184, p. 106318, 2020.

[22] J. Long, X. Wang, W. Zhou, J. Zhang, D. Dai, and G. Zhu, "A Comprehensive Review of Signal Processing and Machine Learning Technologies for UHF PD Detection and Diagnosis (I): Preprocessing and Localization Approaches," IEEE Access, vol. 9, pp. 69876–69904, 2021.

[23] S. Misak, J. Fulnecek, T. Vantuch, and L. Prokop, "Towards the Character and Challenges of Partial Discharge Pattern Data Measured on Medium Voltage Overhead Lines," 2019, 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou.

[24] M. A. Zöller and M. F. Huber, "Benchmark and Survey of Automated Machine Learning Frameworks," Journal of Artificial Intelligence Research, vol. 70, 2021.

[25] A. Truong, A. Walters, J. Goodsitt, K. Hines, C. B. Bruss, and R. Farivar, "Towards Automated Machine Learning: Evaluation and Comparison of AutoML Approaches and Tools," 2019, IEEE 31st international conference on tools with artificial intelligence (ICTAI), Portland.

[26] L. Vaccaro, G. Sansonetti, and A. Micarelli, "An Empirical Review of Automated Machine Learning," Computers, vol. 10, no. 1, p. 11, 2021.

[27] M. Feurer, A. Klein, K. Eggensperger, J. Springenberg, M. Blum, and F. Hutter, "Efficient and Robust Automated Machine Learning," Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 28, pp. 2962–2970, 2015.

[28] L. Ferreira, A. Pilastri, C. M. Martins, P. M. Pires, and P. Cortez, "A Comparison of AutoML Tools for Machine Learning, Deep Learning and XGBoost," 2021, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Shenzhen.

[29] J. Liang, E. Meyerson, B. Hodjat, D. Fink, K. Mutch, and R. Miikkulainen, "Evolutionary neural AutoML for deep learning," 2019, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Prague.

[30] D. Chicco, N. Tötsch, and G. Jurman, "The Matthews correlation coefficient (MCC) is more reliable than balanced accuracy, bookmaker informedness, and markedness in two-class confusion matrix evaluation," BioData Mining, vol. 14, no. 13, 2021.

A systematic review of the software architectures for the development of mobile applications in education

Una revisión sistemática de las arquitecturas de software para el desarrollo de aplicaciones móviles en la educación

Dimas Hernán Concepción Patiño
Maestría en Ciencias y Computación Móvil, Universidad Tecnológica de Panamá
Grupo de Investigación en Tecnologías Computacionales Emergentes (GITCE)
Panamá, Panamá
dimas.concepcion@utp.ac.pa

Lilia Muñoz
Grupo de Investigación en Tecnologías Computacionales Emergentes (GITCE)
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
lilia.munoz@utp.ac.pa

Vladímir Villarreal
Grupo de Investigación en Tecnologías Computacionales Emergentes (GITCE)
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
vladimir.villarreal@utp.ac.pa

César Pardo
Grupo de Investigación GTI
Universidad del Cauca
Popayán, Colombia
cpardo@unicauca.edu.co

***Abstract* — Currently, mobile devices have gone from being objects of entertainment and socialization, to become work tools, powered by applications that facilitate the fulfillment of these tasks. This means not only understanding the problem to be solved, but also the schematization of the software components that will be involved. For this purpose, there are software architectures, which are guidelines that allow organizing and structuring the construction of applications for different devices and environments. Following this context, the following review article will evaluate the most used architectures in educational environments that implement technologies such as cloud, microservices, networks and others. Using the methodology proposed by Barbara Kitchenham and Okoli for literature extraction, from which 11 scientific articles were obtained, who talk about architectures such as n-tier, for augmented reality, client-server, cloud and microservices. As a result, of the 5 architectures that were implemented in the educational projects, the one with the highest rate of development is the client-server with 36.36% of implementations, while the least developed is the microservices with 9.09%, not leaving aside the possibility of combining these structures to achieve a better framework for the construction and development of mobile applications.**

Keywords* — *Applications, architecture, infrastructure, mobile technologies.

***Resumen* — En la actualidad, los dispositivos móviles han pasado de ser objetos de diversión y socialización, para convertirse en herramientas de trabajo, alimentándose de las aplicaciones que facilitan el cumplimiento de estas labores. Pasando a no solo comprender el problema que se desea resolver, sino también la esquematización de los componentes de software que se verán involucrados. Existiendo para ello las arquitecturas de software, las cuales son lineamientos que permiten organizar y estructurar la construcción de las aplicaciones para distintos dispositivos y entornos. Siguiendo este contexto, el siguiente artículo de revisión sistemática evaluará las arquitecturas más usadas en los ambientes educativos que implementen tecnologías como cloud, microservicios, redes y otros. Utilizando la metodología propuesta por Bárbara Kitchenham y Okoli para la extracción literaria, de la cual se obtuvieron 11 artículos científicos, quienes hablan de arquitecturas como n-capas, para realidad aumentada, cliente-servidor, cloud y microservicios. Obteniendo como resultado que de las 5 arquitecturas que se implementaron en los proyectos educativos, quien cuenta con una mayor tasa de desarrollo es la cliente-servidor con un 36.36% de implementaciones, mientras que la menos desarrollada es la de microservicios con 9.09%, no dejando de lado la posibilidad de poder combinar estas estructuras para conseguir un mejor marco de construcción y desarrollo de aplicaciones móviles.**

Palabras claves*— *Aplicaciones móviles, arquitectura, infraestructura, tecnologías móviles.

I. Introducción

El desarrollo de la computación y sistemas móviles han provisto a la humanidad de herramientas tecnológicas al alcance de su bolsillo, integrando dispositivos compactos y poderosos, con la capacidad de procesar grandes flujos de información sin la necesidad de ultimar una computadora. Ejecutándose sobre sistemas operativos como Android, de software libre y elaborado por Google, basado en el kernel linux [1] o iOS, diseñado y lanzado por la compañía Apple Inc. programado en Objective-C [2].

Favoreciendo de esta manera a la actualización de áreas del conocimiento como es el caso de la educación y aprendizaje a distancia, también conocido como m-learning, viabilizando la enseñanza con dispositivos smartphone, tablets y reproductores multimedia, con el apoyo de la

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00042

conexión a las redes inalámbricas [3]. Siendo ejemplo de ello el proyecto realizado en la Universidad de Málaga, sobre la gamificación en educación física: efecto de la metodología m-learning en la asimilación de contenidos, en donde se analizó el efecto de la implementación de una metodología gamificadora en asignaturas afines al área de educación física, obteniendo resultados alentadores, incrementando la motivación de los estudiantes a un 82.8% del percibido al no utilizarla [4]. O La realidad aumentada y la navegación peatonal a través de su implementación en m-learning y e-learning: evaluación de un programa educativo en Chile, en donde se usó a 143 sujetos de prueba, evaluados con un pre y post test, para medir su nivel de aprendizaje. Demostrando que estas tecnologías, junto al trabajo de campo, aumentan la eficacia de los procesos de enseñanza-aprendizaje, promoviendo la interacción con el contenido de aprendido y mejorando el rendimiento de los alumnos en el proceso educativo [5].

Pero el solo hecho de querer concebir un proyecto que incluya estos dispositivos y entornos de desarrollo implicaría no solo un profundo conocimiento de lo que se desea construir, sino también de cómo organizar cada componente para que de manera sinérgica interactúen y ejecuten cada una de sus tareas, es por ello que se idean arquitecturas que permitan que servicios como la computación en la nube, que consiste en el almacenamiento y gestión de la información y contenidos digitales en una plataforma intangible en internet [6]; microservicios, pequeños servicios que ejecutan de manera independiente un proceso, pero que cooperan entre sí por medio de protocolos de comunicación ligeros [7][8]; base de datos, son una colección de datos interrelacionados, utilizados para almacenar información importante de manera electrónica [9]; redes de sensores inalámbricas, conjunto de dispositivos conectados de manera inalámbrica encargados de captar data del entorno para posteriormente ser analizados [10], entre otros, se ordenen en arquitecturas como cliente-servidor; el cual busca desarrollar un modelo de aplicación distribuida con dos actores, uno que comprenderá el rol de proveedor de recursos y el que será el consultor sobre estos, microservicios; se encargan de dividir el sistema en servicios pequeños y ligeros con el fin de mejorar la agilidad, productividad de desarrollo, resiliencia, escalabilidad y facilidad de despliegue [11], n-capas, permite que un número ilimitado de programas se ejecuten de manera simultánea enviando información de un lugar a otro, mediante distintos protocolos [12] o Cloud, compuesto de un conjunto de servicios compartidos públicos o privados accesibles desde la red, pueden ser aprovisionados y liberados con un mínimo esfuerzo del desarrollador [13].

Este artículo presenta una revisión que integra el análisis de distintas arquitecturas móviles en el desarrollo de proyectos educativos con apps en sistemas operativos android y iOS, utilizando la metodología de Bárbara Kitchenham y Okoli, para la documentación de los artículos propuestos y sus resultados. Dividiendo el documento de la siguiente manera: la sección II describe la metodología empleada, en la sección III se muestran los resultados, mientras que en la sección IV se muestra la discusión y finalmente la sección V las conclusiones.

II. METODOLOGÍA

Se apoya de la metodología propuesta por Kitchenham y Okoli con el fin de organizar la evidencia encontrada, en este caso acerca de las arquitecturas para el desarrollo de apps móviles utilizadas en la educación, abarcando una serie de métodos y técnicas de planificación, búsqueda y presentación de la información, incluyendo [14]:

- Propósito de la revisión.
- Protocolo y formación.
- Búsqueda de literatura.
- Criterios para la inclusión.
- Evaluación de la calidad.
- Extracción de datos.
- Síntesis de los estudios.
- Escritura de la reseña.

Para iniciar con el proceso se parte de las siguientes preguntas de investigación, determinando así la ruta a seguir:

- ¿Cuáles son las arquitecturas de software utilizadas en entornos educativos?
- ¿Qué papel juega cada uno de los componentes para el correcto funcionamiento de la arquitectura de software?
- ¿Es importante contar con una arquitectura de software?

De esta manera se establece el periodo de búsqueda de artículos científicos a diez años, iniciando desde el 2012 hasta el 2022, utilizando las bases de datos de Google Scholar, Scielo, MDPI, Dialnet y Elsevier. En donde se emplearon palabras claves en español e inglés, como aplicaciones móviles educativas OR apps educación OR tecnologías de información y comunicación en la educación y sus variantes educational mobile applications OR education apps OR information and communication technologies in education. En la TABLA I. se puede observar el conjunto de artículos científicos recuperados utilizando las palabras claves anteriormente mencionadas.

TABLA I. TOTAL DE ARTÍCULOS ENCONTRADOS AL UTILIZAR LAS PALABRAS CLAVES DE BUSQUEDA

Base de datos		Links de búsqueda	Total, de artículos referenciados	
			Inglés	Español
MDPI	Ingles	https://bit.ly/3B3VzgR	70	0
	Español	https://bit.ly/3z2Os5I		
Scielo	Ingles	https://bit.ly/3OqHj4H	26	8
	Español	https://bit.ly/3PL1TOi		
Google Shcoolar	Ingles	https://bit.ly/3RRHjxO	1,650,000	21,100
	Español	https://bit.ly/3z5yeZB		
ElSevier	Ingles	https://bit.ly/3aVZLo9	2,903	27,605
	Español	https://bit.ly/3b1Pln3		
Dialnet	Ingles	https://bit.ly/3aYgur2	123	17
	Español	https://bit.ly/3cD5i3m		
Total			1,653,328	48,730

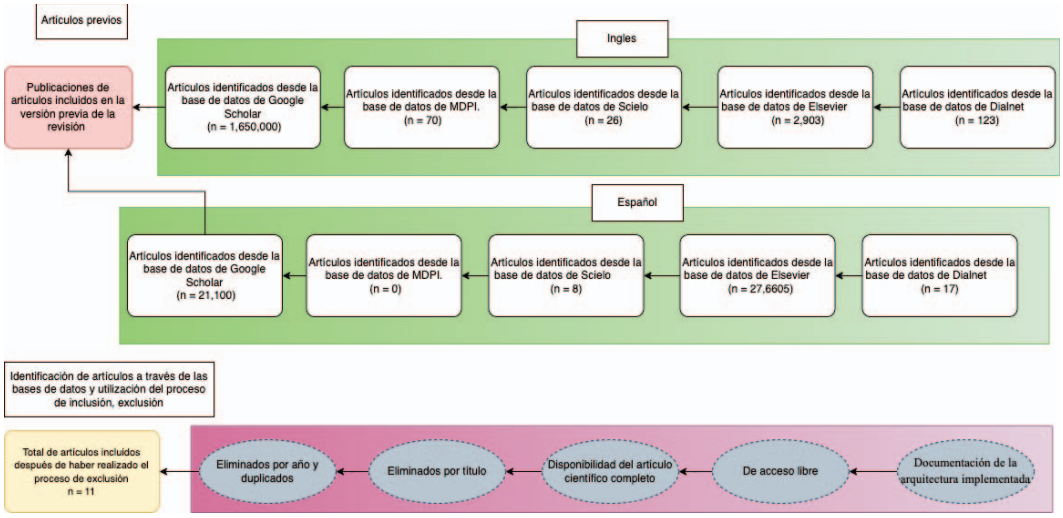


Fig. 1. Proceso de selcción de artículos científicos. Fuente propia.

De este modo con el objetivo de disminuir la pesquisa se tomaron en cuentas los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Disponibilidad del artículo científico completo.
- Relación con los objetivos de la investigación.
- De acceso libre.
- Documentación de la arquitectura implementada.

En consecuencia, con el desarrollo de los criterios de inclusión exclusión, anteriormente expuestos se tiene como resultado las relaciones que se observaran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

III. Resultados

Dentro de los entornos de arquitecturas propuestas para el manejo y desarrollo de aplicaciones móviles orientadas a la educación se distinguen, Cliente – servidor, N-capas, Cloud, Microservicios y de realidad aumentada.

A. Cliente-servidor

Compuesta de dos partes fundamentales, el cliente, es el programa que se ejecuta y hace solicitudes al servidor esperando activamente su respuesta, y el servidor, quien acepta la petición proveniente desde la red, realiza el servicio y devuelve la solicitud [15].

Entre los artículos científicos que integraron estas tecnologías se encuentran:

- Plataforma móvil con realidad aumentada (RA) para la enseñanza de los cálculos. Propone la enseñanza de cálculo diferencial, integral y vectoriales, utilizando una plataforma móvil en la que se accede a información detallada de los tópicos de las asignaturas con ejemplos y ejercicios. Destinado para dispositivos android, en donde se usó el *framework sencha touch* para el desarrollo de la plataforma y vuforia como *framework* de la parte encargada de RA, adicionalmente apache como web server, PHP como lenguaje del servidor y MySQL como motor de la base de datos. Este proyecto permitió que los estudiantes aprendieran de manera autónoma, eliminando las limitaciones de tiempo y espacio presentes en las metodologías de enseñanza tradicionales [16].
- Arquitectura para la configuración de escenarios de aprendizaje móvil, con el uso de la plataforma moodle. Permite la integración de diversos recursos educativos a través de soluciones innovadoras, modulares, móviles y adaptables a las necesidades de los usuarios, contribuyendo a la formación de un ambiente colaborativo por medio de smartphones, tablets y reproductores multimedia con sistema operativo android. Constituido del lado cliente por la aplicación desarrollada para los dispositivos móviles con SO android y el lado servidor por la infraestructura que realiza la integración con moodle, en donde un conjunto de web services actuaron como de interfaz de comunicación entre ambas partes [17] (ver 0.)

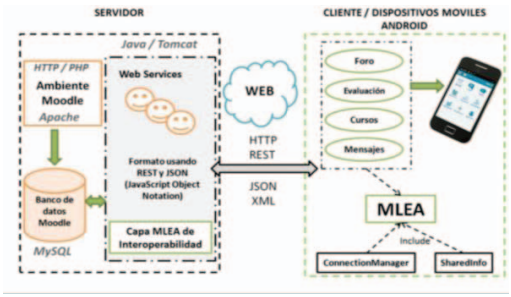


Fig. 2. Arquitectura C-S propuesta, para la configuración de escenarios de aprendizaje móvil con el uso de Moodle [17].

- Desarrollo de una aplicación móvil para el control escolar en instituciones de educación básica. El cual implementa una interfaz intuitiva para control de las actividades académicas realizadas por los profesores y que posteriormente los estudiantes deberán cumplir. El diseño general de la arquitectura lo conforma un servidor web que aloja al web service y el segundo la aplicación móvil que se conecta al web service, por internet [18], como se observa en la 0.

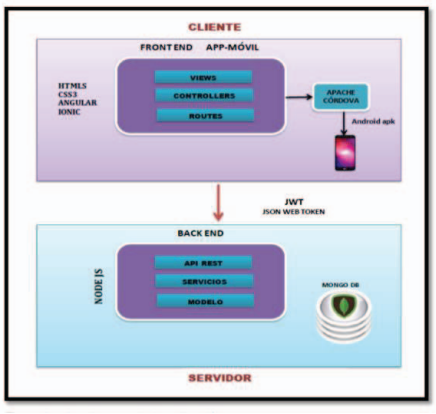


Fig. 3. Arquitectura del aplicativo móvil para el control escolar [18].

- Estudio del aprendizaje basado en el arte para las actividades de indagación en ciencias naturales en la escuela primaria de Taiwán desde la perspectiva del desarrollo sostenible. En donde se llevaron a cabo actividades de enseñanza de las plantas, por lo que los estudiantes aprendieron de la flora y como cuidarla, experimentando con la naturaleza por medio de una aplicación que integraba la RA. La arquitectura del sistema se compuso de tres partes principales: el cliente, donde se usó framework 7 para construir la interfaz gráfica, el servidor junto a su base de datos y el sistema de RA, de igual manera se utilizó plugin cordova del SDK de wikitude para establecer la interfaz de datos backend del sistema de visitas móviles de RA multiplataforma, que se conecta y sincroniza con el servidor y la base de datos [19], como se puede apreciar en la 0.

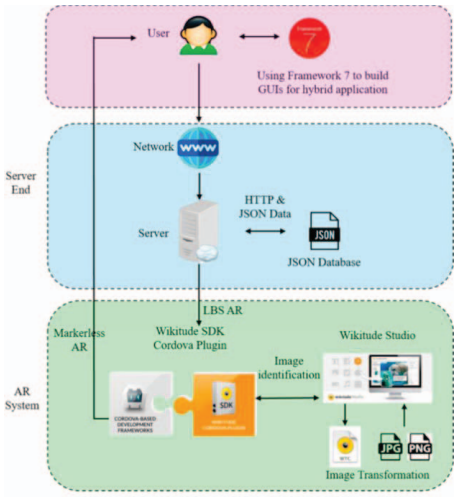


Fig. 4. Arquitectura para el aprendizaje de las ciencias naturales [19].

B. N-capas

También conocida como arquitectura en capas, ayuda a estructurar las aplicaciones descomponiéndolas en grupos de subtareas, en las que cada uno se encuentra a un nivel particular de abstracción [20].

Entre los artículos científicos que integraron estas tecnologías se encuentran:

- Aplicación para dispositivos móviles en el aprendizaje y enseñanza de la lectura y escritura en niños entre las edades de 5 a 7 años. Plantea como objetivo crear una app para dispositivos móviles que faciliten el aprendizaje de la lectura y escritura, proveyendo herramientas interactivas. En esta ocasión la arquitectura que se aprecia en la Fig. 5, la dividen con base a 4 capas, la primera contine el diseño de la interfaz donde se haya el renderer, la segunda alberga la lógica del negocio que a su vez se compondrá de los scripst y de la conexión a la base de datos, la tercera tendrá la localización de la base de datos y la última los plugins necesarios para el funcionamiento de Sqlite dentro del dispositivo móvil con sistema operativo Android [21].

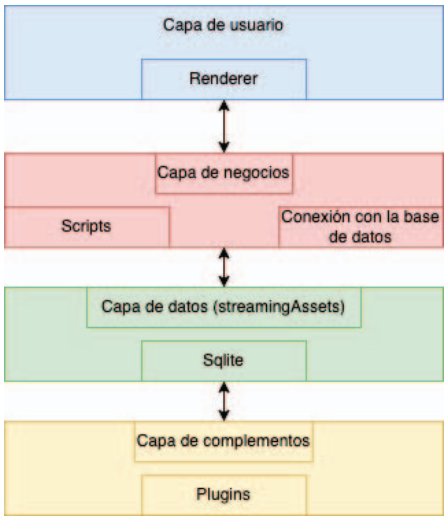


Fig. 5. Arquitectura de la aplicación para dispositivos móviles en el aprendizaje y enseñanza de la lectura y escritura en niños entre las edades de 5 a 7 años [21].

- Una propuesta de arquitectura para los sistemas informáticos de gestión del conocimiento en instituciones de educación superior. Tiene como objetivo apoyar al proceso de creación, transferencia y aplicación del conocimiento, para lo que divide la arquitectura en 6 capas, la primera la capa interfaz, en donde inicia y finaliza la interacción con el usuario, permitiéndoles poder acceder a los servicios y herramientas. La segunda de suscripción, autenticación y acceso, dependiendo del nivel de autorización, el usuario accederá al resto de las capas manteniendo el nivel de seguridad y privacidad. La tercera, la de aplicación, podrá tomar los datos y traducirlos en beneficio a las operaciones de las instituciones. La cuarta, la de procesos de gestión del conocimiento, conformada por herramientas de servicios, clasificada en 5 tipos según su funcionalidad, herramientas de captura, de recuperación, colaboración, aprendizaje y de búsqueda. La quinta, la capa de repositorios, donde se guardan todos los datos, base de datos, documentos, archivos de la institución. La sexta de infraestructura, provee el hardware y software compatibles para

garantizar que los componentes del sistema de gestión del conocimiento puedan trabajar de manera eficiente y en todo momento [22] (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.).

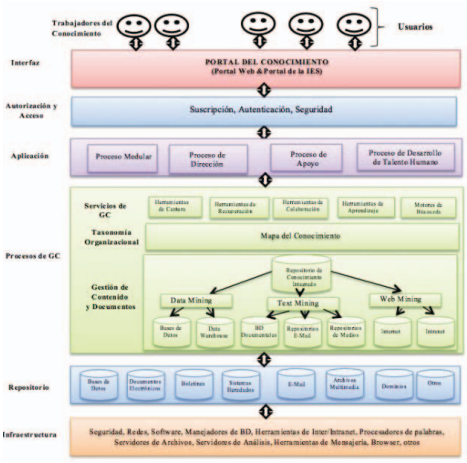


Fig. 6. Arquitectura propuesta para el sistema de gestión de conocimiento en instituciones de educacieon superior [22].

C. *Basada en RA*

Es una arquitectura proporcionada por el Sdk de vuforia, compuesto de un conjunto de librerías que permiten la programación de aplicaciones destinadas a procesar la realidad aumentada [23].

Entre estos tenemos:

- Desarrollo de una aplicación de RA mediante la arquitectura vuforia para la obtención de información de cuadros. Compuesta por la cámara donde se consolida cada uno de los *frame* capturados y enviados al *traker*. El *imageConverter*, convierte la imagen capturada en un formato admisible por OpenGL. *Traker*, detecta y renderiza la imagen capturada con algoritmos de visionado. Renderizado de video de fondo, realiza el análisis de la imagen almacenada por la cámara en el objeto estado. Código de la app es donde se inicializan los componentes. Objeto reconocer, contienen el xml de configuración que permite al developer modificar algunas características del objeto y un fichero binario del patrón que permite identificarlo [24] (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

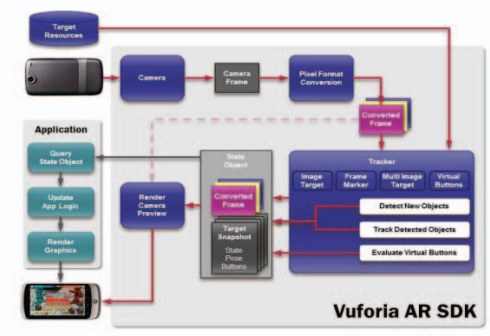


Fig. 7. Arquitectura del kit de desarrollo de software (SDK) de vuforia [24].

- Learn2Write: Aplicación móvil basada en realidad aumentada y aprendizaje automático para aprender a escribir. Implementa una aplicación móvil que utiliza técnicas de aprendizaje automático y realidad aumentada para enseñar a escribir el alfabeto. Desarrollada en unity3D, y con el lenguaje de programación C#. La aplicación no requiere una conexión a Internet para funcionar porque incluye todos los modelos 3D de los alfabetos y el modelo de aprendizaje automático entrenado [25], como se puede observar en la Fig. 8.

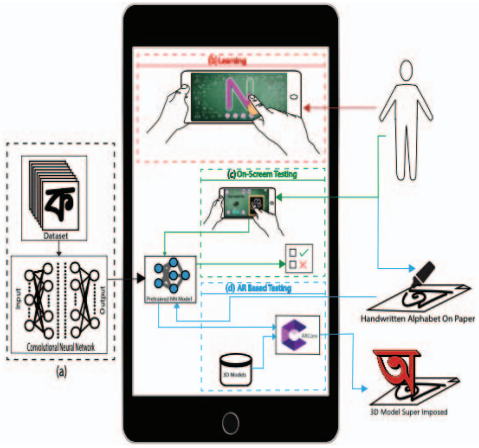


Fig. 8. Arquitectura de la aplicación Learn2Write [25].

D. *CLoud*

Viene a ser un modelo de aprovisionamiento de recursos de IT, siendo su principal característica que los recursos, infraestructura, plataforma y aplicaciones, son ofrecidos y consumidos como servicios a través de internet [26].

Entre los artículos científicos que integraron estas tecnologías se encuentran:

- Metamodelo de Aprendizaje Estratégico (MAE): Arquitectura de la capa de infraestructura, solución basada en la Cloud Computing. Desarrollada con el objetivo de soportar la atención a cientos de alumnos que se encuentran en la modalidad de enseñanza e-Learning. La arquitectura se basa Cloud integrando cuatro componentes el Learning Mangement System (LMS), Personalized Virtual Learning Enviroment (PVLE), Management Information System (MIS) en la capa de aplicación, en la capa de infraestructura el centro de almacenamiento y procesamiento, en la capa infraestructura el servidor de base de datos, de aplicación y el modeló ontológico y la capa de servicios integrada por los consumidores (clientes) [27].

- Propuesta de un generador de aplicaciones educativas basadas en televisión digital usando arquitectura de cómputo en la nube. Compuesto por 6 niveles, el primero genera un conjunto de plantilla, con una distribución y tema en específico. El segundo

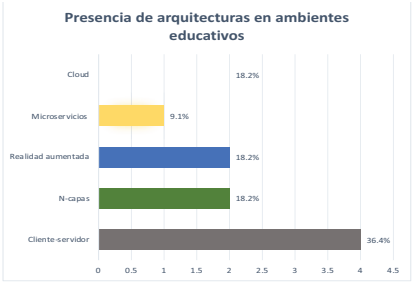


Fig. 10. Presencia de las arquitecturas en proyectos educativos. Fuente propia

corresponde a un módulo de macada semántica. El tercero compuesto de un planificador que acompaña las reglas de los perfiles de los estudiantes, generando un plan y ruta de aprendizaje. El cuarto se encarga de traducir cada acción de los objetos de aprendizaje. El GMA (Generation Module Apk) traduce la información recibida del nivel anterior y finalmente el ultimo nivel se encarga de ajustar cada página de la presentación [28].

E. Microservicios

Es un estilo de arquitectura donde cada uno de los servicios funciona de manera individual e independiente, distribuidos en distintos lugares convirtiéndolo en sistemas distribuidos [7]. Entre los artículos científicos se encuentran:

- Propuesta de arquitectura de microservicios, metodología Scrum para una aplicación móvil de control académico. Su estructura divide la arquitectura en tres porciones, el lado cliente desarrollara la aplicación con ayuda de react native, el lado servidor, se compondrá el api grateway de los microservicios y sus configuraciones, y por último la sección de los microservicios donde se dividirá en componentes de autenticación, asistencia, notas, encuesta, notificación y reportes [29], como se muestra en la 0.

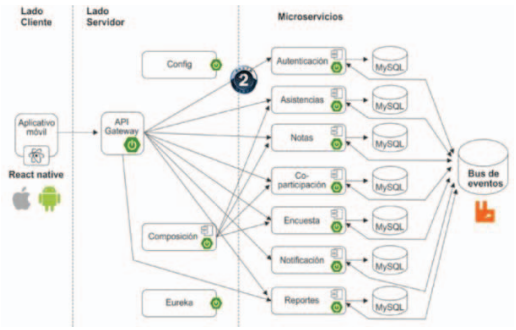


Fig. 9. Arquitectura de microservicios propuestas para la aplicación móvil de control académico [29].

IV. Discusión

Luego de haber analizado los artículos que hacen referencia a la implementación de arquitecturas de software en el desarrollo de aplicaciones móviles para el apoyo a la educación, se constata que de las 5 arquitecturas encontradas, la que posee la mayor cantidad de referencias es la basada en cliente-servidor con un 36.36%, seguidamente con un 18.18% se menciona la de n-capas, de realidad aumentada y cloud, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en donde el eje X hace referencia a las arquitecturas encontradas y el eje Y a la cantidad de artículos científicos.

Del mismo modo, al organizar los artículos incluidos se observa una distribución por año de desarrollo, en donde los años 2012, 2015 y 2021 cuentan con una mayor recopilación de artículos científicos y en su contraparte los años 2014, 2017, 2018, 2019 y 2022 con una menor recopilación, como se visualiza en la 0.

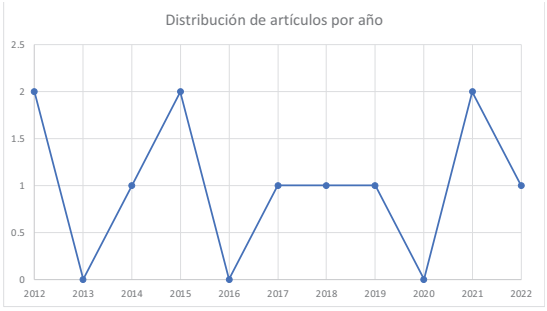


Fig. 11. Distribución de artículos por año. Fuente propia.

Si bien es cierto que estos artículos integran arquitecturas de software, en la búsqueda de organizar y estructurar la interacción de cada uno de sus componentes, el entorno en que se elaboran es muy distinto, abarcando áreas para desarrollo de aplicaciones nativas, hibridas o multiplataforma, evidenciando así la importancia de reconocer no solo el problema que se busca resolver, sino también la interacción y desencadenamiento de cada servicio implementado, evento que solo se verá completado si integramos la arquitectura que mejor se adapte a la situación expuesta.

Por otro lado, es importante comentar algunas limitaciones que tuvo este trabajo, entre ellas: las palabras claves y criterios de exclusión e inclusión pueden contener elementos subjetivos, afectando de manera directa el número de estudios seleccionados. Además, se enuncian algunos de los problemas y/o limitaciones con los que se enfrentaron los estudios de la muestra seleccionada:

- Poca documentación de software y hardware utilizado.
- Solo mencionan la arquitectura más, no del cómo está compuesta o su función dentro del proyecto.
- Solo se tomaron en cuenta artículos científicos y estudios que fuesen de acceso libre.

V. Conclusión

En esta revisión sistemática de literatura se ha presentado una recopilación de artículos científicos, proyectos y estudios que integran el uso de arquitecturas de software en ambientes móviles para entornos educativos, proporcionando un marco de trabajo actualizado, lo que permite formular nuevas actividades de investigación. Con base a la literatura analizada se puede concluir que:

La confección de las arquitecturas de software dependerá mucho de los componentes y problemas a solucionar, así como el tiempo y recursos, tanto del personal de trabajo como económicos, cuente el proyecto a desarrollar. Ejemplo de ello se observa al momento de crear una aplicación basada en

cloud y otra con almacenamiento local, haciendo evidente que para implementar una solución de cloud la adquisición de servicios de terceros es necesaria y muchas veces no son gratis, lado contrario al crear una app que funcione de manera local, donde los únicos costos en los que se incurrirá serán en el de desarrollo.

Así mismo, el reconocer los componentes, habiendo construido correctamente los requerimientos funcionales y no funcionales, y sus interacciones, es importante para no cometer errores de implementación o que al final del proyecto no se cumpla con los requisitos mininos de salida.

Además, con una adecuada arquitectura se construirá una base sólida, permitiendo la escalabilidad y rendimiento de la aplicación, reduciendo de manera considerable la duplicación de código, considerando que esta brindará una visión general del entorno a desarrollar.

En este sentido, en un trabajo futuro, se espera desarrollar una arquitectura de software adecuada, para ambientes móviles con el objetivo de integrar en las capas tecnologías de RA, con el fin de diseñar una aplicación para evaluar el proceso de enseñanza-aprendizaje en jóvenes que padecen de trastorno del espectro autista.

AGRADECIMIENTO

Dimas Concepción es apoyado por una beca del Programa de Fortalecimiento de los Postgrados Nacionales de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT-Panamá). Lilia Muñoz y Vladimir Villarreal son miembro del Sistemas Nacional de Investigación (SNI). César Pardo agradece a la Universidad del Cauca, en el cual trabajo como profesor asociado.

REFERENCIAS

[1] O. Android, "Android", *Retrieved February*, vol. 24, p. 2011, 2011.

[2] I. Alvarez, "Um estudo sobre o sistema operativo iOS da Apple".

[3] M. Al-Emran, V. Mezhuyev, y A. Kamaludin, "Technology Acceptance Model in M-learning context: A systematic review", *Computers & Education*, vol. 125, pp. 389-412, oct. 2018, doi: 10.1016/j.compedu.2018.06.008.

[4] J. Benítez-Porres, O. Romero-Ramos, E. Fernández-Rodríguez, R. Merino-Marban, y I. López-Fernández, "Gamificación en Educación Física: efecto de la metodología M-Learning en la asimilación de contenidos", 2019.

[5] J. Joo-Nagata, F. Martinez Abad, J. García-Bermejo Giner, y F. J. García-Peñalvo, "Augmented reality and pedestrian navigation through its implementation in m-learning and e-learning: Evaluation of an educational program in Chile", *Computers & Education*, vol. 111, pp. 1-17, ago. 2017, doi: 10.1016/j.compedu.2017.04.003.

[6] I. Staff, "Cómputo en la Nube: Nuevo Detonador para la Competitividad de México", *Instituto Mexicano para la Competitividad AC, México*, 2012.

[7] D. López y E. Maya, "Arquitectura de Software basada en Microservicios para Desarrollo de Aplicaciones Web", 2017.

[8] A. Nebel, "Arquitectura de microservicios para plataformas de integración", 2019.

[9] D. M. Kroenke, *Database processing: Fundamentals, design & implementation*. Pearson Educación, 2002.

[10] E. Mendoza, P. Fuentes, I. Benítez, D. Reina, y J. Núñez, "Red de sensores inalámbricos multisalto para sistemas domóticos de bajo costo y área extendida", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 17, n.º 4, pp. 412-423, 2020.

[11] N. Alshuqayran, N. Ali, y R. Evans, "A Systematic Mapping Study in Microservice Architecture", en *2016 IEEE 9th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA)*, nov. 2016, pp. 44-51. doi: 10.1109/SOCA.2016.15.

[12] E. A. Gonzaga, J. A. Á. Cedillo, y A. G. Mejía, "Arquitecturas en n-Capas: Un Sistema Adaptivo", *Polibits*, n.º 34, pp. 34-37, 2006.

[13] I. Odun-Ayo, M. Ananya, F. Agono, y R. Goddy-Worlu, "Cloud Computing Architecture: A Critical Analysis", en *2018 18th International Conference on Computational Science and Applications (ICCSA)*, jul. 2018, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICCSA.2018.8439638.

[14] C. Okoli, "A guide to conducting a standalone systematic literature review", *Communications of the Association for Information Systems*, vol. 37, n.º 1, p. 43, 2015.

[15] O. Lizama, G. Kindley, J. J. Morales, y A. Gonzales, "Redes de computadores: Arquitectura cliente-servidor", *Universidad Tecnica Federico Santa Maria*, pp. 1-8, 2016.

[16] L. E. P. Caballero y S. V. Duarte, "Plataforma móvil con realidad aumentada para la enseñanza de los cálculos [Mobile Platform with Augmented Reality for the Teaching of Calculus]", *Ventana Informática*, n.º 30, 2014.

[17] G. T. de Clunie *et al.*, "Arquitectura para la configuración de escenarios de aprendizaje móvil, con el uso de la plataforma Moodle", 2012.

[18] S. K. Sócola Correa, "Desarrollo de un aplicativo móvil para el control escolar en instituciones de educación básica.", 2018.

[19] J.-H. Lo, Y.-F. Lai, y T.-L. Hsu, "The Study of AR-Based Learning for Natural Science Inquiry Activities in Taiwan's Elementary School from the Perspective of Sustainable Development", *Sustainability*, vol. 13, n.º 11, 2021, doi: 10.3390/su13116283.

[20] L. C. Escalante, "El patrón de arquitectura n-capas con orientación al dominio como solución en el diseño de aplicaciones empresariales", *Tecnología y Desarrollo (Trujillo)*, vol. 11, n.º 1, pp. 59-66, 2013.

[21] J. J. Guamangallo Jácome y M. Andrade Mullo, "Aplicación para dispositivos móviles para el aprendizaje y enseñanza de la lectura y escritura en niños entre las edades de 5 a 7 años", 2021.

[22] V. De Freitas y G. Y. Oltra, "Una propuesta de arquitectura para los Sistemas Informáticos de Gestión del Conocimiento en Instituciones de Educación Superior", *Revista ESPACIOS| Vol. 36 (Nº 10) Año 2015*, 2015.

[23] A. Simonetti Ibanez y J. Paredes Figueras, "Vuforia v1. 5 SDK: Analysis and evaluation of capabilities", 2013.

[24] C. Iñarrea Sagüés, "Desarrollo de una aplicacion de Realidad Aumentada mediante la arquitectura Vuforia para la obtencion de informacion de cuadros", 2012.

[25] Md. N. Opu, Md. R. Islam, M. A. Kabir, Md. S. Hossain, y M. M. Islam, "Learn2Write: Augmented Reality and Machine Learning-Based Mobile App to Learn Writing", *Computers*, vol. 11, n.º 1, 2022, doi: 10.3390/computers11010004.

[26] M. A. Murazzo y N. R. Rodríguez, "Mobile cloud computing", presentado en XII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, 2010.

[27] R. B. Silva-López, I. I. Méndez-Gurrola, y O. Herrera-Alcántara, "Metamodelo de aprendizaje estratégico (MAE): Arquitectura de la capa de infraestructura, solución basada en la Cloud Computing.", *Res. Comput. Sci.*, vol. 93, n.º 2015, pp. 175-188, 2015.

[28] J. Guzmán-Luna, I.-D. Torres, y J. F. Alvarez, "Propuesta de un generador de aplicaciones educativas basadas en televisión digital usando arquitectura de cómputo en la nube", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, n.º 24, pp. 33-41, 2017.

[29] P. E. De la Cruz Vélez, M. H. E. Ramirez, y O. C. Estrella, "Propuesta de arquitectura de microservicios, metodología Scrum para una aplicación móvil de control académico: Caso Escuela Profesional de Obstetricia de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos", *Hamut´ ay*, vol. 6, n.º 2, pp. 141-158, 2019.

Proposal for the evaluation of the quality of the Metadata for a Research Data Repository
Propuesta para la evaluación de la calidad de los Metadatos para un Repositorio de Datos de Investigación

Juliette Morales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
juliette.morales@utp.ac.pa

Lilia Muñoz
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
lilia.munoz@utp.ac.pa

Amaly Fong
Universidad Marítima de Panamá
Panamá, Panamá
alflim01@gmail.com

***Abstract*— The article seeks to analyze the current existing rules regarding the normalization of metadata for the publication of research data in a digital / Dataverse repository. For this, it is intended to identify the current proposals related to the generation of metadata for the normalization of research data, as well as to identify the problems linked to the absence of metadata quality standards in digital repositories. The aim is to find possible solutions that allow the improvement of the actual quality of metadata in digital repositories.**

Keywords— metadata, research data, digital repositories, Dataverse, standard, quality

***Resumen* — El artículo analiza las reglas actuales existentes en cuanto a la normalización de metadatos para la publicación de datos de investigación científica en un repositorio digital / de Dataverse con el propósito de identificar las problemáticas vinculadas a la ausencia de normas de calidad de metadatos en repositorios digitales. Para ello, se identifican las propuestas más actuales relacionadas con la generación de metadatos, luego se organiza sistemáticamente la información y se realiza un análisis. Con lo anterior se definen las metodologías para posibles soluciones que permitan el mejoramiento de la calidad actual de metadatos en los repositorios digitales.**

Palabras claves —metadatos, datos de investigación, repositorios digitales, Dataverse, estándar, calidad

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el término de ciencia abierta ha ido tomando cada vez más fuerza en la comunidad científica. El mismo, tiene como propósito que la información, los procesos, los datos y los productos de una investigación estén accesibles (acceso abierto), se aprovechen de manera fiable (ya sea mediante datos abiertos, reúso, licencias abiertas) y que traduzcan en la participación activa de todas las partes interesadas, de modo que se garantice el acceso a la información [1].

En relación con este tema, un componente que se encuentra muy vinculado con la ciencia abierta son los repositorios institucionales [2], estos son plataformas digitales fundamentadas en bases de datos mediante las cuales podemos realizar consultas, subir y descargar documentos académicos. En este sentido, son accesibles para las universidades y centros de investigación científica, razón por la cual se han convertido en entornos importantes en la creación de conocimiento científico.

Cabe resaltar que, los repositorios institucionales se clasifican dependiendo de qué parte de su producción académica se encuentran en ellos [4]. En dicho contexto se consideran desde los artículos científicos, de revistas indexadas, hasta los datos de investigación relacionados directamente con diversos estudios. Las instituciones cuentan con un gran volumen de información útil, que puede ser compartida por medio de las plataformas, por este motivo, dichas instituciones pueden contar con varios repositorios con el objetivo de distribuir adecuadamente la información.

Además, los repositorios institucionales son de variada tipología, la cual depende de su objetivo, siendo los de Recursos Digitales Abiertos (RDA), reconocidos por su excelente función en la de preservación, organización y difusión de la producción académica [3]. Es por ello que son utilizados para garantizar la visibilidad de la producción científica y una mejor administración del conocimiento institucional.

Es necesario resaltar la importancia de que los metadatos se encuentren lo más correctos y completos posibles para garantizar la búsqueda de forma adecuada de los documentos almacenados en el repositorio, y se asegure su difusión y reutilización. Por una parte, la completitud es requerida para se que el llenado de los datos se haga de la forma más íntegra. En cuanto a su corrección, el metadato tiene que cumplir con las normas que se hayan establecido de lo contrario tiene que adaptarse para que encaje de manera acertada en el modelo del sistema que se esté llevando a cabo [2].

También es importante destacar que los datos de investigación se encuentran definidos como los registros de hechos que se utilizan como proveedores fundamentales para la investigación y que la comunidad científica acepta cada vez más como indispensables para validar los resultados [6]. Como ejemplos de estos datos de investigación se pueden mencionar las mediciones, grabaciones de entrevistas, estadísticas, respuestas a encuestas, observaciones e imágenes resultantes del estudio pertinente.

Finalmente es apropiado reconocer casos particulares y viables para nuestro país. En este sentido, se reconoce las ventajas de Dataverse, que es una aplicación web de código

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00043

abierto que permite compartir, preservar, citar, explorar y analizar datos de investigación. Una de las razones de dichas ventajas es la instalación del software, el cual luego permite albergar múltiples archivos virtuales (colecciones de Dataverse). Cada una de estas colecciones contiene datasets, y cada dataset contiene metadatos descriptivos y archivos de datos, las cuales pueden incluir documentación y código que acompaña la información. Otra ventaja es su función como método de organización, las colecciones de Dataverse debido a que pueden contener otras colecciones dentro de sí mismas [5].

En este análisis se presenta una propuesta para evaluar la calidad de los metadatos en un repositorio, la estructura del repositorio esta esquematizada con Dataverse.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan algunos antecedentes, en la sección 3 se describen aspectos relevantes de los metadatos y su importancia para los repositorios. La sección 4 se presentan los materiales y métodos y en la sección 5 la propuesta a desarrollar. Finalmente, en la sección 6 se mencionan las conclusiones.

II. Antecedentes

Algunos estudios relacionados a la calidad de los metadatos han sido publicados en los últimos años, dentro de ellos se puede mencionar un trabajo realizado en Colombia, el cual una metodología que funcionará para medir la calidad de metadatos dentro de un repositorio [12]. Los autores buscan evaluar el estado de la calidad tomando en cuenta los repositorios digitales colombianos dependiendo de las distintas directrices que utilizan.

También se puede tomar en cuenta una investigación publicada en 2018 que se hizo para estudiar la relación entre la calidad de los metadatos y la efectividad de un sistema que pretende mejorar la efectividad de la organización en hoteles cinco estrellas ubicadas en Jordania, utilizando técnicas de aprendizaje automático y modelos de ecuaciones estructurales.

Por su parte, otro estudio mostró los resultados del estudio sobre los metadatos de una serie de videos educacionales localizados en la plataforma Youtube [13]. El mismo pretendía proponer un modelo de predicción para anticipar la calidad de los recursos abiertos educacionales (Open Educational Resources).

Estas aproximaciones presentan excelentes aportes, sin embargo, ninguno de ellos esta relacionado a la calidad de los metadatos de repositorios de investigación.

III. Importancia de los Metadatos

Desde que surgió la idea de los metadatos en las bibliotecas en los años de 1960, estos se empleaban únicamente como referentes al proceso automatizado y a la descripción de la información que documenta la información contenida en las bases de datos. Pero con los cambios en el uso y producción de la información, la actividad de los metadatos toma un rol prioritario en las comunidades bibliotecarias [7].

En la comunidad bibliotecaria, ciertamente se ha generado una cultura activa en términos de quehacer con los metadatos. Se puede señalar que se han constituido grupos de amplio debate en torno a la concepción de la actividad de los metadatos [8], los cuales distan, pero no se alejan del mundo de la catalogación, que se ha construido en otro espacio y sobre otras condiciones de desarrollo de las bibliotecas [8].

Naturalmente, con el paso del tiempo y el auge del avance tecnológico, fue imprescindible el desarrollo de modelos que cubriesen necesidades para que los metadatos fuesen lo más exactos posibles, de modo que se facilitara no solo el almacenamiento dentro de servidores de repositorios digitales, sino también la búsqueda de documentos posteriormente.

Por esto, se entiende también que, para las universidades y centros de investigación, es de suma importancia contar con las herramientas necesarias que les permita consumir y difundir todo tipo de documentos generados a base de estudios con el resto de la población (no únicamente la comunidad científica) de forma abierta; respetando la autonomía académica y corresponder a la población en común. Para eso, el intelecto científico debería estar libre y sus ganancias difundidas de manera universal [1]. Es así como se puede dar el uso de los repositorios institucionales digitales por su parte, ya que como mencionamos anteriormente, cuentan como uno de los utensilios más útiles para promover esta iniciativa.

A. Estándares de Metadatos

A continuación, se describirá brevemente las dos organizaciones que han desarrollado estándares (más específicamente un diccionario de datos en el caso de PREMIS), que no buscan una imposición obligatoria, sino una referencia para que cada institución los adapte como considere de acuerdo con las necesidades que tenga su repositorio, sin dejar ese modelo de metadatos muy alejado a un estándar más entendible a nivel global.

A continuación, en este artículo se detallará sobre el muy conocido estándar Dublin Core (por ejemplo, muy aceptado por repositorios como DSpace) y el Diccionario de Datos PREMIS.

B. Dublin Core

Fue desarrollado por la DCMI (Dublin Core Metadata Initiative), que es una organización en apoyo a la innovación en diseño de metadatos y buenas prácticas a través el ecosistema de metadatos. DCMI trabaja abiertamente y es apoyada por un modelo de pago por membresía [9].

El grupo de elementos de metadatos de Dublin Core cuenta con quince propiedades para uso en descripción de un recurso. Estos términos en los vocabularios DCMI están orientados a ser utilizados en combinación con otros, vocabularios compatibles que en el contexto de perfiles para una aplicación y en la base del Modelo Abstracto de DCMI (DCAM) [10]. En la Figura 1, se puede visualizar el esquema del modelo de datos propuesto en Dublin Core.

Algunos de los elementos son los siguientes:

- Coverage (cobertura): tema temporal o espacial del recuso, aplicabilidad espacial del recurso, o la jurisdicción bajo la que el recurso es relevante.
- Creator (creador): entidad primariamente responsable de desarrollar el recurso.
- Date (fecha): punto o periodo en el tiempo asociado a un evento en el ciclo de vida del recurso.
- Description (descripción): descripción del recurso.

- Format (formato): formato del archivo, medio físico o dimensiones del recurso.
- Identifier (identificador): referencia no ambigua del recurso dentro de un contexto dado.
- Language (lenguaje): lenguaje en el que fue d
- Subject (materia): el tema del recurso.
- Title (título): nombre dado al recurso.
- Type (tipo): la naturaleza o género del recurso.

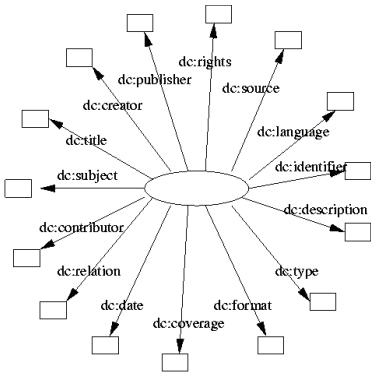


Fig. 1. Esquema Dublin Core.

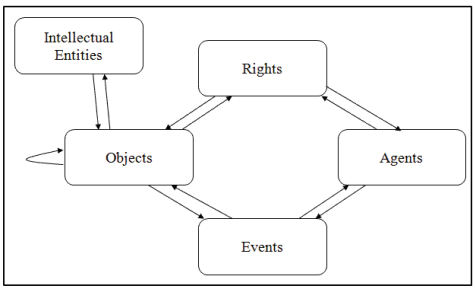
C. Diccionario de Datos PREMIS

El diccionario de datos PREMIS (Preservation Metadata Maintenance Activity) es un estándar internacional para metadatos, apoya la preservación de objetos digitales y asegurar su usabilidad a largo plazo. Fue desarrollado por un equipo internacional de expertos constado por más de 30 participantes, representando cinco países distintos y una variedad de dominios, incluyendo bibliotecas, museos, archivos, agencias gubernamentales y el sector privado [11].

Este diccionario de datos es un recurso completo y práctico para implementar metadatos de preservación en sistemas de preservación digital. Por consiguiente, definen los metadatos de preservación como [11]:

- Aquellos que apoyan la viabilidad, renderización, entendimiento, autenticidad e identidad de los recursos digitales en un contexto de preservación;
- Los que representan la información que la mayoría de los repositorios de preservación necesitan conocer para preservar materiales digitales en el transcurso del tiempo;
- Los que enfatizan "metadatos implementables": definidos rigurosamente, apoyado por normas para la creación, manejo y uso, y orientados hacia flujos de trabajo automatizados; y,
- Los que incorporan neutralidad técnica: no hace suposiciones sobre tecnologías de preservación, estrategias, almacenamiento y administración de metadatos, etc.

Cuenta con un modelo de datos que define unidades semánticas. Cada unidad semántica definida en el Diccionario de Datos es mapeada a una entidad que está organizada en un modelo de datos simple.



Entonces, una unidad semántica puede ser entendida como una propiedad de una entidad. Este modelo define cuatro entidades importantes en lo que se refiere a las actividades de preservación digital:

Objects (objetos), Events (eventos), Agents (agentes) y Rights (derechos) [11]. En la Figura 2, se despliega el esquema creado por PREMIS relacionando las entidades mencionadas.

Fig. 2. Entidades en PREMIS y sus relaciones.

IV. Materiales y Método

Esta sección se describen los materiales y métodos que serán utilizados en esta propuesta.

A. Materiales

Uno de los materiales fundamentales es un servidor de prueba, con el fin de realizar la instalación correctamente y realizar las primeras configuraciones necesarias. Una vez se haya validado la instalación, se procederá con la implementación en otro servidor de producción para que se utilice como repositorio nacional de datos abiertos de investigación.

B. Repositorio de Dataverse

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, Dataverse es un proyecto realizado para almacenar colecciones datos de investigación abiertos con el fin de difundirlos con el resto de la población, de modo que se utilicen libremente y se puedan citar de forma directa y se den los créditos necesarios a los investigadores. Este proyecto fue desarrollado y se mantiene en mejoramiento por parte del Institute for Quantitative Social Science (IQSS) de la universidad de Harvard [5], junto con muchos colaboradores y contribuidores a nivel global. Al ser un proyecto de código abierto, otros pueden utilizarlo e implementarlo para tener sus propias colecciones de datos en un Dataverse de la institución en la que trabajen.

En la Figura 3, se observa la página de inicio del Dataverse de Harvard. Una vez dentro de una página de Dataverse, el usuario puede buscar directamente sobre un tema de interés, o bien se puede navegar por las distintas secciones categorizadas por las áreas de estudio almacenadas dentro del repositorio. Cabe destacar que, a nivel de Latinoamérica, se cuenta con más de diez repositorios de Dataverse de diferentes instituciones, siendo la más antigua entre las observadas IBICT, lanzada en 2015 en Brasil. La mayoría de las colecciones de Dataverse regionales que existen actualmente son de dicho país, mientras que hay otras de países como Chile, Perú, Ecuador y Colombia [15].

Respecto con el tema de metadatos, Dataverse soporta los siguientes estándares y formatos para su exportación:

- Dublin Core
- DDI (DATA Documentation Initiative Codebook 2.5)
- DDI HTML Codebook
- DataCite 4
- JSON (formato nativo del software de Dataverse)
- OAI_ORE
- OpenAIRE
- Schema.org JSON-LD

Fig. 3. Página en línea del Dataverse de Harvard.

Cada una de estas exportaciones contiene la versión publicada más reciente de los metadatos del documento [16].

C. *Método*

La instalación del software cuenta con una serie de prerrequisitos los cuales son imprescindibles de tener antes de intentar utilizar el script de levantamiento inicial de Dataverse. De no contar con ellos, el proceso podría resultar como errado, lo que no nos permitiría continuar con las configuraciones y adecuaciones del programa.

Para la realización de esta investigación, aunque la página de guía del Usuario de Dataverse recomienda RHEL o sus derivados como RockyLinyx o AlmaLinux, se utilizó otro sistema operativo [17]. Se consideró, ir más allá de la recomendación y realizar la instalación utilizando Ubuntu, este sistema nos permitió ventajas en el manejo y costos. Afortunadamente, existen indicios de que las implementaciones orientadas en Debian / Ubuntu son funcionales.

Una vez que se haya realizado la implementación correctamente, es de suma importancia tomar en cuenta la necesidad de dar conocer este proyecto a la comunidad científica con el propósito de realizar un sondeo que nos permita conocer cuántos investigadores estarían dispuestos a compartir los datos de sus investigaciones para almacenarlos en colecciones de Datos de Dataverse. Para ello se tomaría en cuenta a todas las universidades e instituciones de investigación a nivel nacional sin importar su área de estudio.

En consecuencia, se comenzará con el proceso que requerirá que los investigadores en conjunto con sus instituciones de profesión para que luego se realicen capacitaciones en materia del uso de la plataforma, los tipos de perfiles asignados y el método para subir sus datos en el repositorio. De esta forma, se espera tener un modelo de los metadatos que deben de tomar en cuenta los investigadores para que se redacten cuando estén en este proceso.

V. PROPUESTA

Se está realizando el proceso de implementación primeramente dentro de un servidor de prueba virtualizado. El mismo cuenta con los servicios de Payara, que es un servidor de aplicaciones de código abierto creado en 2014 y posteriormente en 2016 salió Payara Services que ofrece soluciones de apoyo para el servidor de aplicaciones. Para el Dataverse, este es el servidor que lo mantendrá en la red.

También cuenta con el uso de SOLR y PostgreSQL, donde SOLR es la aplicación que permite realizar las búsquedas dentro de nuestro repositorio e indexar correctamente los resultados. Por otro lado, PostgreSQL es la aplicación de base de datos en la que se almacenarán todos los archivos de datos. Ambas son de Código abierto igualmente, y esto es por mencionar un poco de sus prerrequisitos de instalación de mayor importancia.

Todas estas instalaciones se realizan por medio de comandos ejecutados en el terminal de Ubuntu Server. En la Figura 4 se observa la instalación correcta de los servicios de Payara dentro del servidor de prueba.

Fig. 4. Instalación de Payara en Ubuntu Server 20.04.

Del mismo modo, se realizó la instalación de PostgreSQL directamente desde su repositorio, donde tendremos conexión para facilitar actualizaciones una vez que agreguemos su llave de acceso, como se observa en la Figura 5.

Fig. 5. Anexo correcto dentro de APT al repositorio de PostgreSQL.

Cabe destacar, que no se recomienda realizar la instalación de Dataverse o de sus prerrequisitos como usuario root. Por lo cual, para la instalación de SOLR se debe de crear primeramente un usuario propio quien será el dueño del programa. Cuando está instalado correctamente siguiendo los pasos de configuración, entonces podremos visualizar su

página de inicio ubicada en el puerto 8983, como se ve en la Figura 6.

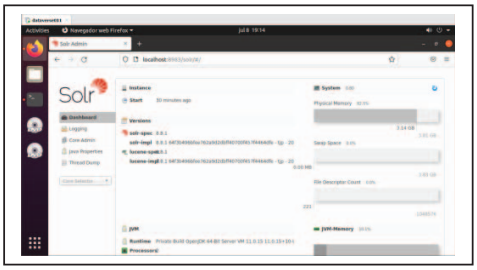


Fig. 6. Página de Inicio de SOLR.

Además, es necesario también describir sobre cómo Dataverse funciona en cuanto a su estructura.

Como se observa en la Figura 7, la red de varios Dataverse (donde se encuentra conectado más de un Dataverse) funcionan almacenando los archivos y catalogando la información que contiene, donde se puede conectar con otras redes de Dataverse u otros repositorios mediante el protocolo OAI-PMH (Open Archives Initiative – Protocol for Metadata Harvesting), que es el utilizado para la transmisión de los metadatos al momento de realizar la cosecha entre ellos [18].

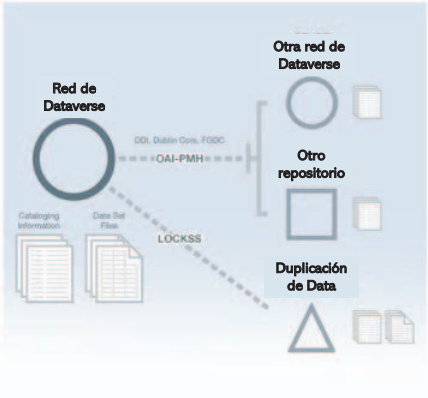


Fig. 7. Estructura en que funciona Dataverse.

Ahora bien, dentro de una red de varios Dataverse, se encuentran los distintos nodos que son Dataverses que pueden pertenecer a distintas instituciones dentro de una organización, o a diferentes departamentos dentro de una sola institución; dependiendo de cómo se administre [18]. A su vez, dentro de un Dataverse están las colecciones de estudios que pueden contener varios estudios o mantenerlos de manera individual; y almacenado en ellos su información catalogada, los archivos de texto, los archivos dataset y archivos de datos gráficos, como se representa gráficamente en la Figura 8.

Posteriormente, una vez que se tengan todas las consideraciones completas, desde la implementación, la capacitación de los centros de investigación, instituciones y universidades, el lanzamiento del repositorio al público y se cuente con una cantidad favorable de distintos grupos de datos con sus metadatos más recientes realizados por los investigadores dueños de esos datos; se espera comenzar con el proceso de evaluación de la calidad de los metadatos dentro del repositorio, para ello se plantea la utilización de métricas propias de la ingeniería de software aplicadas al contexto de los metadatos de repositorios.

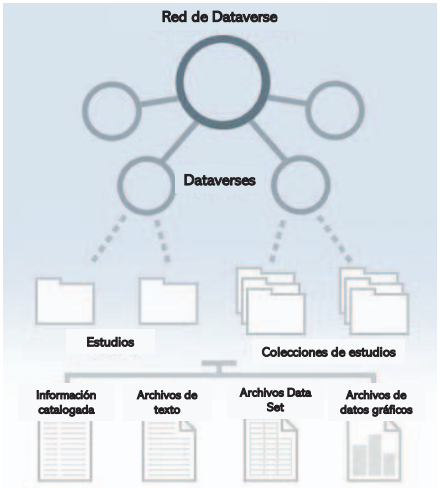


Fig. 8. Estructura dentro de una red de Dataverse.

Esto se realizará tomando en cuenta la estructura inicial (basada en Dublin Core por defecto) que proporciona Dataverse, para la confección de los metadatos a la hora de publicar un archivo, de forma que se le dé una estructura a la forma en que se escribirán los mismos e iniciar el proceso de la normalización de los metadatos. Por ejemplo, en el campo {nombre}, se podría sugerir a los investigadores el siguiente formato:

Apellido, Primer Nombre Inicial de Segundo Nombre.

Visto de otra forma:

Morales, Juliette D.

Se sugiere ese formato por ser el mayormente utilizado en el proyecto implementado en Harvard, por lo que facilitaría la búsqueda de las colecciones de datos subidas por un autor específico. Así mismo se tratará el resto de los campos, los cuales se tienen que proporcionar inicialmente por defecto, para que una vez que el repositorio sea más robusto, se pueda evaluar la calidad del modelo actual y mejorar así el uso de los metadatos en el repositorio nacional de datos de investigación científica. De manera que se comprueben directamente las problemáticas que puedan darse, que como indican las referencias antes mencionadas, de no contar con los metadatos suficientes, correctos y necesarios en una publicación, puede suceder que el sitio no trae todos los resultados realmente relacionados con lo que el usuario desea visualizar dentro de la plataforma.

Por último, para la métrica de los metadatos, primero se realizará la extracción de estos con el uso de herramientas de código abierto (por ejemplo, ParsCit) [19] que permita el

análisis sintáctico de cadenas de referencia y que cuente con diversidad temática y flexibilidad para el formato de los archivos (ya sea texto plano, PDF, etc). Una vez que se realice esta extracción, analizar los posibles indicadores como errores ortográficos, coherencia y completitud de los metadatos. Con estos indicadores establecidos, se harán análisis de carácter estadísticos que resulten en la ayuda de ajustes de los campos de metadatos que en ese momento se estén aplicando, realizar los cambios y sensibilizar a los investigadores sobre dicho producto.

VI. Conclusión

Se considera imprescindible la realización de la implementación de un repositorio de datos abiertos de investigación nacional, no solo a fin de que por ejemplo otros investigadores y estudiantes puedan acceder a estas colecciones de datos y citarlas correctamente; sino también porque contar con este repositorio de Dataverse dará paso a que otros países en la región y a nivel internacional conozcan más sobre los aportes de investigación que genera Panamá.

Con este proyecto, se podrá ayudar a la difusión de los productos obtenidos de investigaciones realizadas a lo largo del país, además de asegurar que aparezcan correctamente al generar búsquedas dentro de la plataforma. Beneficiando así a toda la comunidad científica, logrando prevenir dificultades con las que podría encontrarse el usuario utilizando el repositorio. En última instancia, se espera que con el modelo de metadatos que se desarrollará a futuro, se facilite a veces tedioso proceso para todos los que deseen publicar sus colecciones de datos para el acceso abierto en el repositorio de Dataverse.

Agradecimientos

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por la oportunidad para el desarrollo de su práctica profesional. También se hace especial agradecimiento al Sistema Nacional de Investigación por el apoyo a las investigadoras.

Referencias

[1] UNESCO, «Recomendación de la UNESCO sobre la Ciencia Abierta,» de Conferencia General de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), París, 2021.

[2] A. Chuc Arcia y V. H. Menéndez Domínguez, «Desarrollo de un recomendador de metadatos para un repositorio utilizando técnicas de extración de conocimiento,» Tecnología Educativa Revista CONAIC, vol. 8, nº 2, pp. 45-50, 14 Diciembre 2021.

[3] J. D. T. Guerrero Sosa, V. H. Menéndez Domínguez y M. E. Castellanos Bolaños, «Indicadores de calidad en investigaciones científicas: Antecedentes,» Abstraction & Application: Revista Electrónica de la Facultad de Matemáticas, vol. 19, pp. 6-24, 2018.

[4] J. Alhuay Quispe, D. Quispe Riveros, J. Pacheco Mendoza y L. V. Bautista Ynofuente, «Visibilidad y calidad de metadatos en repositorios de universidades peruanas: Propuesta indicadores para evaluación,» 2018.

[5] Institute for Quantitative Social Science (IQSS), «About,» [En línea]. Available: https://dataverse.org/about.

[6] A. Morales Vargas y L. Codina, «Atributos de calidad web para repositorios de datos de investigación en universidades,» Hipertext.net, nº 19, pp. 49-62, Noviembre 2019.

[7] A. A. Rodríguez García, «El aprovechamiento de los metadatos en las bibliotecas,» E-Ciencias de la Información, vol. 3, nº 1, pp. 1-13, 2013.

[8] A. A. Rodríguez García, Las nuevas entidades de información analizadas desde la perspectiva de la organización de la información, Primera ed., Ciudad de México: Universidad Autónoma de México, 2010.

[9] Dublin Core Metadata Innovation, «About DCMI,» 19 Julio 2022. [En línea]. Available: https://www.dublincore.org/about/. [Último acceso: 26 Julio 2022].

[10] Dublin Core Metadata Innovation, «Dublin Core™ Metadata Element Set, Version1.1: Reference Description,» 14 Junio 2012. [En línea]. Available: https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dces/. [Último acceso: 26 Julio 2022].

[11] PREMIS Editorial Committee, PREMIS Data Dictionary for Preservation Metadata version 3.0, PREMIS Editorial Committee, 2015.

[12] C. A. Ruiz Jaramillo, Diagnóstico de la calidad en los metadatos de los repositorios colombianos, Medellín: Universidad EAFIT, 2015.

[13] M. Tavakoli, M. Elias, G. Kismihók y A. Sören, «Metadata Analysis of Open Educational Resources,» LAK21: 11th International Learning Analytics and Knowledge Conference, pp. 626-631, 2021.

[14] Cariniana Rede Brasileira de Serviços de Preservação Digital, «IBICT,» 2015. [En línea]. Available: http://repositoriopesquisas.ibict.br/.

[15] IQSS, «The Dataverse Project,» 2022. [En línea]. Available: https://dataverse.org/.

[16] IQSS, «Dataset + File Management,» Dataverse Project, 13 Diciembre 2021. [En línea]. Available: https://guides.dataverse.org/en/5.9/user/dataset-management.html#supported-metadata. [Último acceso: 27 Julio 2022].

[17] Institute for Quantitative Social Science (IQSS), «Prerequisites,» 13 Diciembre 2021. [En línea]. Available: https://guides.dataverse.org/en/5.9/installation/prerequisites.html. [Último acceso: 27 Julio 2022].

[18] Universo Abierto, «Dataverse: una aplicación web de código abierto para compartir, preservar, citar, explorar y analizar datos de investigación,» Biblioteca de Traducción y Documentación de la Universidad de Salamanca, 10 Enero 2016. [En línea]. Available: https://universoabierto.org/2016/01/10/dataverse-una-aplicacion-web-de-codigo-abierto-para-compartir-preservar-citar-explorar-y-analizar-datos-de-investigacion/. [Último acceso: 28 Julio 2022].

[19] S. Fontanarrosa, «Asistente para el depósito de documentos en Repositorios utilizando extracción semiautomática de metadatos,» 10 Septiembre 2015. [En línea]. Available: http://biblioteca.puntoedu.edu.ar/bitstream/handle/2133/5814/Fontanarrosa.pdf?sequence=2&isAllowed=y. [Último acceso: 2022].

Approach to optimize energy production and demand using systems of inequalities and regression modeling

Enfoque para optimizar la producción y demanda de energía mediante sistemas de inecuaciones y modelo de regresión

Ivonne Nunez
Maestría en Ciencias en Computación Móvil, Universidad Tecnológica de Panamá
Grupo de Investigación en Ingeniería de Tecnologías Aplicadas a la Sociedad (GIITAS)
Panamá, Panamá
ivonne.nunez@utp.ac.pa

Elia Cano
Universidad Tecnológica de Panamá
Grupo de Investigación en Ingeniería de Tecnologías Aplicadas a la Sociedad (GIITAS)
Panamá, Panmá
elia.cano@utp.ac.pa

Carlos Rovetto
Universidad Tecnológica de Panamá
Grupo de Investigación en Ingeniería de Tecnologías Aplicadas a la Sociedad (GIITAS)
Panamá, Panamá
carlos.rovetto@utp.ac.pa

Edmanuel Cruz
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
edmanuel.cruz@utp.ac.pa

Andrzej Smolarz
Lublin University of Technology
Lublin, Polonia
a.smolarz@pollub.pl

Juan Jose Saldana-Barrios
Universidad Tecnológica de Panamá
Grupo de Investigación en Ingeniería de Tecnologías Aplicadas a la Sociedad (GIITAS)
Chiriquí, Panamá
juan.saldana@utp.ac.pa

***Abstract*— The prediction of electricity generation and consumption is a tool of great interest within the electricity system, where the presence of renewable and distributed generation sources is constantly growing. Specifically, this type of forecasting is essential for energy management because it allows optimization while maintaining a balance between availability, cost, reliability, and efficiency to manage energy flows in real time between production and demand. In this context, in this article, we will study the problem of prediction of both production and demand (consumption) by type of energy for a set of national data, for this, a method is performed with a system of inequalities to mathematically model the process and its respective computational representation through an analysis using a linear regression model to make the prediction in the future. It was concluded with real data that the predictive model has a good performance and can be used as a support tool in the management and control of the Panamanian electrical network. It would be important to evaluate other models for optimization by testing with real and large-scale data to meet the technical requirements for safe and secure power system operations. Finally, we provide further research challenges that contribute to realize truly smart grid systems.**

Keywords*— Smart energy, smart grids, energy consumption prediction, automation, mathematical modeling, regression method, energy efficiency, renewable energy, resilience.

***Resumen* — La predicción de generación y consumo eléctrico supone una herramienta de enorme interés dentro del sistema eléctrico, donde la presencia de fuentes de generación renovable y distribuida está en constante crecimiento. Específicamente, este tipo de predicción es esencial para la gestión energética debido a que, permite la optimización manteniendo un equilibrio entre disponibilidad, coste, fiabilidad y eficiencia para administrar los flujos de energía en tiempo real entre producción y demanda. En este contexto, en el presente artículo, estudiaremos el problema de predicción tanto de producción y demanda (consumo) por tipo de energía para un conjunto de datos nacionales, para ello, se realiza un método con un sistema de inecuaciones para modelar matemáticamente el proceso y su respectiva representación computacional a través de un análisis empleando un modelo de regresión lineal para hacer la predicción a futuro. Se concluyó con datos reales que el modelo predictor tiene un buen desempeño y puede ser utilizado como herramienta de apoyo en la gestión y control de la red eléctrica panameña. Resultaría importante evaluar otros modelos para la optimización, mediante pruebas con datos reales y a gran escala para cumplir con los requisitos técnicos para operaciones seguras y protegidas del sistema de energía. Finalmente, proporcionamos más desafíos de investigación que contribuyan a realizar sistemas de redes verdaderamente inteligentes.**

Palabras claves* — *Energía inteligente, redes eléctricas inteligentes, predicción del consumo de energía., automatización, modelo matemático, método de regresión, eficiencia energética, energías renovables, resiliencia.

I. Introducción

La producción y demanda de energía en sus diversas formas, ha incrementado de manera sostenida en la última década. Dicha producción y demanda de energía sitúa un panorama general en el cual el sistema eléctrico ve superada sus capacidades de control y monitoreo [1].

Una de las oportunidades más importantes que tiene el país, consiste en aprovechar todas las posibilidades de reducción en el crecimiento de la demanda, para que no afecten otras metas de desarrollo y que reduzca la necesidad de instalación de nuevas plantas generadoras de electricidad y

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00044

el consumo de combustibles fósiles. Lo deseable es renovar la demanda y producción de energía del país mediante una matriz energética que asegure el suministro oportuno y continuo de electricidad y combustible, promoviendo el uso eficiente de energía para mantener y mejorar la competitividad del país con predominio de fuentes renovables y al menor costo [2][3].

Cuando se produce energía eléctrica, esta debe consumirse al mismo tiempo. A diferencia de otros bienes de la sociedad, como, por ejemplo: petróleo y gas, la energía eléctrica no se puede almacenar de forma eficiente y, por tanto, no podemos sobre producirlo. Por otro lado, su escasez conducirá a la falta de suministro eléctrico, lo cual es perjudicial, no solo para las empresas de generación y distribución de electricidad [4], sino para los consumidores que dependen de una infraestructura crítica mayormente impulsada por energía eléctrica y una economía sostenida en un alto porcentaje por este recurso [1].

Una manera de asegurar que la implementación sea realmente ventajosa para el suministro eléctrico y su sostenibilidad es aplicar técnicas de optimización para minimizar o maximizar ciertos factores deseados. La predicción o pronóstico en el sector energía es crucial para mejorar la toma de decisiones en términos de eficiencia energética y mejorar la gestión de la oferta y la demanda, sin embargo, la predicción de energía sigue siendo una tarea desafiante [5][6].

En este sentido, se pretende abordar el problema de predicción de producción y demanda de energía y según la literatura consultada es una contribución innovadora porque proporciona una solución utilizando un sistema de inecuaciones. Adicionalmente, se emplea el uso de un modelo de regresión para el análisis de los datos. Finalmente, en esta propuesta hemos abordado el caso que enfrenta la producción y demanda de energía en el sector eléctrico de Panamá utilizando datos reales provistos por el ente oficial.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta el marco teórico donde se dará una descripción general, la definición del problema en cuanto a predicción en sistemas de redes eléctricas en la sección 3, la sección 4 propone el modelo matemático basado en un sistema de ecuaciones lineales para representar el problema planteado, la sección 5 presenta el modelo de regresión lineal, los resultados y discusión de la implementación en la sección 6, las limitaciones del estudio en la sección 7. Finalmente, la sección 8 concluye el documento, también con una perspectiva futura destinada a proporcionar algunas ideas sobre posteriores direcciones de investigación.

II. Marco teórico

A. *Pronóstico de la producción y demanda de energía*

Los pronósticos de producción y demanda son la llave para un buen planeamiento de la operación de los sistemas eléctricos, puesto que, dependiendo del horizonte de tiempo a evaluar, pueden ayudar a determinar si en algún momento se llegará a producir un déficit de la capacidad de generación. Esta información oportuna es conveniente para considerar la construcción de nuevas centrales de generación de energía, expansión del sistema de transmisión o impulsar políticas de ahorro energético, o de otra manera, puede indicar que hay un exceso de capacidad de generación. En la fig. 1 podemos observar las áreas donde se beneficia el sector eléctrico al hacer uso de predicciones [7][8].

Fig. 1. Usos del pronóstico de energía

Una correcta predicción de la demanda de energía juega un papel importante, porque puede servir en la toma de decisiones de las empresas eléctricas respecto a qué cantidad y a qué precios sería conveniente realizar transacciones con otras empresas del sector.

Si se llegara a tener un pronóstico subestimado de la demanda de energía, podría provocar que el sistema no esté preparado ante un alza de la demanda, y como consecuencia, se estaría comprometiendo la confiabilidad y la seguridad del sistema, así como, en un caso extremo, tener que realizar un racionamiento de la demanda. Es importante tomar en consideración que actualmente en nuestro país se están desarrollando proyectos de infraestructura con alto consumo eléctrico como lo es la línea 3 del Metro de Panamá, un proyecto vital para el mejoramiento de la logística y movilidad limpia y sostenible [9]. Por el contrario, si el pronóstico resultase demasiado alto, los costos de oportunidad pueden ser elevados al tener comprometidos, de forma improductiva, cuantiosos fondos económicos durante largos períodos de tiempo [10]–[12].

B. *Método de pronóstico*

De una manera muy resumida, la evolución de los métodos de pronóstico registró un avance significativo. En las últimas décadas, se han utilizado regularmente varios modelos tradicionales para la predicción de la demanda de energía. Los factores clave de éxito de estos métodos se basan en la explotación de algoritmos capacitados para aprender a través de prueba y error y mejorar su rendimiento con el tiempo. El límite y la adaptabilidad de cada método dependen de la diversidad y profundidad temporal de la información recolectada [13]–[15]. No existe un modelo único que se pueda utilizar en todas las condiciones. El desarrollo de modelos específicos de la aplicación es, por lo tanto, esencial y requiere la consideración caso por caso.

Existen varios métodos para predecir la producción y demanda de energía:

1) Métodos estadísticos (tradicionales): tienen la ventaja de ser técnicas matemáticas bien desarrolladas y estudiadas, pero dependen de modelos matemáticos complejos, además de tener dificultad para lidiar con variaciones rápidas como

lo son factores climáticos que influyen en el consumo de energía eléctrica, por ejemplo temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento, las precipitaciones y la luminosidad [16]–[18]. Dentro de estos métodos resaltamos el modelo a estudiar, que es el modelo regresivo que, consiste en una aproximación para modelar la relación entre una variable escalar dependiente "Y" y una o mas variables explicativas nombradas con "X" y luego trazar una recta que nos indicará la tendencia de un conjunto de datos continuos, cuya formula es (1):

$$Y = mX + b \tag{1}$$

Donde Y es el resultado, X es la variable, m la pendiente (o coeficiente) de la recta y b la constante o también conocida como el "punto de corte con el eje Y" en la gráfica (cuando X=0).

2) Métodos de inteligencia artificial: permiten tratar mejor la incertidumbre, así como las funciones no lineales. La predicción basada en la teoría de la Inteligencia Artificial, ha tenido una gran aceptación en el mundo científico y de la ingeniería, convirtiéndose en la técnica más extendida para la previsión de cargas [15], [19]–[21].

3) Métodos híbridos: estos métodos son una combinación de los métodos antes mencionados y permiten abordar y manejar de mejor forma los datos masivo producidos, la incertidumbre y la intermitencia de estos sistemas de energía [22][23].

C. Metodología utilizada

A continuación, se describe el proceso de desarrollo de este enfoque para predecir la producción y consumo de energía:

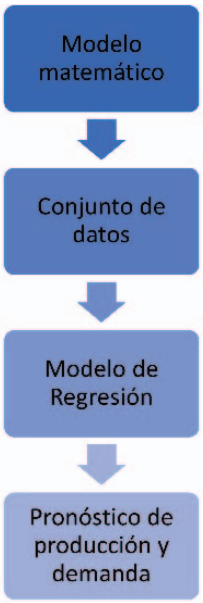


Fig. 2. Diagrama de bloques del modelo pronóstico

- Se desarrolla el sistema de ecuaciones lineales con base a ciertos criterios y restricciones, esto nos permitirá aplicar dichas variables a el conjunto de datos reales, el cual se entrena aplicando el modelo de regresión y por último obtenemos nuestras predicciones a futuro sobre los datos de prueba.

III. Definición del problema

El sector de la energía se encuentra viviendo una revolución, con soluciones disruptivas e innovadoras y nuevos enfoques emergentes, que requieren ser puestos en marcha bajo el contexto del Mercado Nacional para facilitar su contribución a la transición energética.

Existe un gran potencial de modernización del sistema eléctrico, aplicando la innovación en cuanto a flexibilidad de carga y uso de baterías como habilitadores claves para un mejor sistema integrado de energías renovables con capacidad para almacenar y ofrecer varios servicios auxiliares para estabilizar la red eléctrica [24].

Desde los inicios del Mercado Eléctrico en Panamá se ha registrado un comportamiento al alza en su tasa anual de crecimiento compuesto, para los diversos rubros relacionados al uso de energía eléctrica. Al encontrarnos con un crecimiento anual del 2.15% de la demanda observamos la problemática de la gran diferencia entre demanda y generación que genera, este aumento de la demanda también ocasiona problemas de estabilidad y perdida de potencia activa conocido como perdida en los sistema [25].

En Panamá, al año 2019 la generación anual de electricidad fue de 11,140 GWh (Gigavatio-hora), junto a una demanda máxima de 1,961 MW (Megavatios), la cual en el 2020 incrementó a 1,969 MW y, que el 20 de mayo de 2021 alcanzó los 2,020 MW. Esto muestra, aunque de forma modesta, que la demanda máxima de energía continúa incrementando año a año aún con el impacto del COVID-19. La figura 4 muestra la demanda máxima de energía que se ha generado en el país por las empresas distribuidoras.

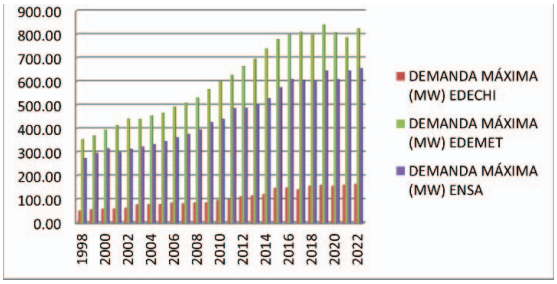


Fig. 3. Demanda máxima generada en MW (megavatios) por las empresas distribuidoras.

La matriz de generación de electricidad está basada fundamentalmente en la producción de energía hídrica, y ha diversificado sus fuentes de manera importante. La introducción de tecnologías de generación a partir de gas natural ha desplazado parcialmente la generación con combustibles más contaminantes y menos eficientes como lo son el Bunker y Diésel. La generación por medio de sistemas fotovoltaicos y eólicos ha permitido iniciar a construir la resiliencia del sector generación a los impactos del cambio climático y familiarizar al Mercado Eléctrico [26]. La fig. 3

muestra la capacidad instalada por tipo de tecnología que se produce en Panamá.

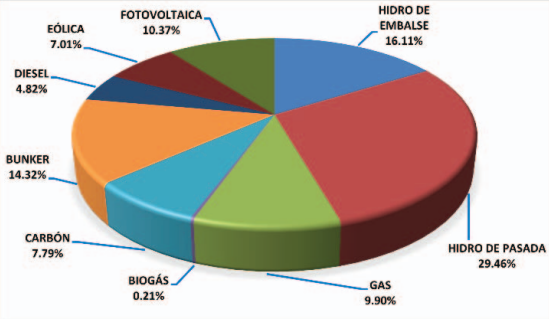


Fig. 4. Capacidad instalada por tipo de tecnología en MW (megavatios) [27].

La estacionalidad (Estación Seca y Estación Lluviosa) tiene un impacto importante en el costo marginal al considerar que, para los meses de estación seca (mes 1 a 3 en Panamá) usualmente se generan los máximos de demanda y consumo anuales, aunado a que se tiene un mayor costo de operación del sistema y costos marginales más altos, puesto que se debe cubrir este mayor consumo con una mayor generación proveniente de la generación térmica, producto de una disminución en los recursos hídricos [27].

Por ende, se pretende modelar y pronosticar la demanda y producción de energía de Panamá a través de modelos y utilizarlos para determinar el abastecimiento del suministro eléctrico optimizando los recursos, de tal forma que se logre suplir la demanda a mínimo costo de operación y déficit.

IV. Modelo Matemático

El modelo matemático consiste en la implementación de ecuaciones lineales con tres incógnitas para representar la capacidad de producción según sus límites de capacidad. Cada incógnita representa la demanda o consumo de las empresas distribuidoras de energía. Basados en las características del problema y los límites establecidos para el estudio, se formula una aproximación con dos sistemas de ecuaciones para la producción por tipo de energía.

	EDECHI		EDEMET		ENSA		Capacidad instalada (MW)
$Producción_n$	a_1x	+	b_1y	+	c_1z	≤	$CapIn_1$

Fig. 5. Sistema de ecuaciones 1: Restricción de capacidad instalada.

	EDECHI		EDEMET		ENSA		Capacidad firme (MW)
$Producción_n$	a_2x	+	b_2y	+	c_2z	≤	$CapFir_1$

Fig. 6. Sistema de ecuaciones 2: Restricción capacidad firme.

Para la definición de la demanda (consumo) se utilizarán variables que representan las características que condicionan la demanda máxima de producción, siendo la capacidad instalada y la capacidad firme los criterios a evaluar. Las variables EDECHI, EDEMET y ENSA, serían las empresas distribuidoras de producción energética del país.

Así tenemos que la constante *a, b* y *c* con subíndice uno (1) representan la capacidad instalada en megavatios, es decir, es el potencial o volumen máximo de producción que se puede lograr durante un período de tiempo determinado. De la misma forma, las constantes *a, b* y *c* con subíndice dos (2) representan la capacidad firme en megavatios, es decir, es la potencia máxima que podría generar la unidad de generación con un alto nivel de seguridad (dependiendo si es renovable o no). Afecta de una probabilidad de indisponibilidades de generación y es el valor bajo al cual se remunera la potencia del parque generador del sistema. A continuación, presentamos la definición de las variables:

x = empresa distribuidora EDECHI.
y = empresa distribuidora EDEMET.
z = empresa distribuidora ENSA.
$CapIn_n$ = Capacidad máxima instalada de producción en megavatios (MW).
$CapFir_n$ = Capacidad máxima firme de producción en megavatios (MW).

Las variables utilizadas las reemplazamos como constantes en el sistema de inecuaciones y la podemos estructurar de la siguiente forma:

Sistema de inecuaciones 1: restricción para verificar la capacidad máxima instalada.
a_1 = capacidad instalada de EDECHI
b_1 = capacidad instalada de EDEMET
c_1 = capacidad instalada de ENSA

Sistema de inecuaciones 2: restricción para verificar la capacidad máxima firme.
a_2 = capacidad firme de EDECHI
b_2 = capacidad firme de EDEMET
c_2 = capacidad firme de ENSA
las condiciones para los sistemas de inecuaciones son:

a) El sistema de ecuaciones lineales se diseña con el método algebraico [28].

b) El nivel de producción es la fuente de dos ecuaciones. En consecuencia, la generación producida determina los pares de ecuaciones.

c) Cada ecuación formara parte de un sistema de inecuaciones. Cada sistema representa las restricciones que controlan la capacidad instalada y firme de producción.

d) La suma de los terminos de cada ecuación debe ser menor o igual a la capacidad o límite de demanda para la producción.

e) Las empresas distribuidoras y la producción deben llegar a la demanda máxima posible con estricto cumplimeinto de las restricciones de capacidad instalada y firme.

f) La definicion de las restricciones de capacidad instalada y firme es obligatoria para garantizar el cumplimiento de la demanda máxima mensual de la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A (ETESA) [29], la Secretaria Nacional de Energía [24] y la Autoridad Nacional de Servicios Públicos [30].

V. Modelo de Regresión Lineal

La demanda de las variables del modelo y, x y z son obtenidas aplicando regresión lineal simple sobre el conjunto de datos que constituyen la demanda anual de electricidad de cada una de las distribuidoras. Para los cálculos se utilizó

paquetes de la distribución Anaconda y se programó en Python con DataFrame en la librería Pandas.

Los modelos de cada distribuidora es el siguiente:

$$x = i_1 + m_1 D_{EDECHI}$$
$$y = i_2 + m_2 D_{EDEMET}$$
$$z = i_3 + m_3 D_{ENSA}$$

donde i_1, m_1, i_2, m_2, i_3 y m_3 son los coeficientes de las regresiones lineales de las distribuidoras.

En la tabla 1 se puede observar los datos del consumo total de energía de las distribuidoras en 24 años, desde 1998 hasta 2021, obtenidos de la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A (ETESA) [29]. La representación gráfica de los mismos se muestra en la figura 7.

Utilizando la regresión lineal simple y los valores de la demanda de cada distribuidora, se obtienen los modelos predictivos. En la TABLA I se muestran los datos que se emplearon para entrenar los modelos. Se utilizaron 0.2% de los datos en la prueba en los modelos.

TABLA I. Demanda máxima de las distribuidoras

DEMANDA MÁXIMA (MW)			
AÑO	EDECHI	EDEMET	ENSA
1998	50.88	354.14	274.59
1999	55.97	369.67	295.49
2000	58.07	394.35	314.83
2001	60.10	412.81	298.63
2002	62.39	441.25	312.41
2003	77.32	439.34	321.69
2004	77.74	454.39	333.22
2005	78.08	466.76	345.24
2006	83.85	492.42	361.86
2007	82.31	509.15	375.99
2008	84.01	530.36	394.87
2009	85.28	567.38	425.71
2010	95.02	601.27	439.29
2011	101.23	626.72	485.75
2012	110.20	664.29	487.15
2013	114.81	695.44	501.29
2014	120.25	738.41	527.33
2015	146.78	778.55	574.37
2016	148.81	798.31	608.45
2017	140.42	809.83	604.82
2018	155.59	797.84	601.76
2019	159.89	839.70	644.88
2020	155.26	806.97	607.63
2021	160.68	786.01	644.21

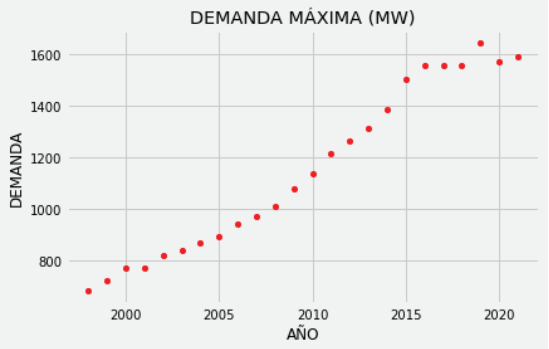


Fig. 7. Demanda máxima anual en MW (megavatios).

Las ecuaciones resultantes para cada modelo predictivo son:

$$x = -23.62 + 0.11 * D_{EDECHI}$$
$$y = -46.73 + 1.99 * D_{EDEMET}$$
$$z = 2.06 + 0.39 * D_{ENSA}$$

En las TABLAS II, III y IV se muestran los resultados obtenidos de forma aleatoria de la predicción de las demandas de cada una de las distribuidoras.

TABLA II. Resultados de los datos de la demanda versus la predicción para EDECHI en MW.

AÑO	DEMANDA	PREDICCIÓN
2011	101.23	109.672682
2019	159.89	156.979800
2012	110.20	114.937448
2021	160.68	151.096748
2001	60.10	61.114716

TABLA III. Resultados de los datos de la demanda versus la predicción para EDEMET en MW.

AÑO	DEMANDA	PREDICCIÓN
2004	454.39	457.108963
2007	509.15	508.185407
2016	798.31	802.397731
1999	369.67	384.961610
2020	806.97	809.546432

TABLA IV. Resultados de los datos de la demanda versus la predicción para ENSA en MW.

AÑO	DEMANDA	PREDICCIÓN
2001	298.63	302.141461
2014	527.33	541.124566
2007	375.99	378.338353
1999	295.49	282.535085
2010	439.29	443.730540

El coeficiente de determinación (r^2) es utilizado en los modelos de regresión para evaluar qué tan bien se ajustan los datos de cada modelo. El ajuste óptimo se logra cuando se alcanza un valor de 1 en dicho coeficiente. En la TABLA V se muestran los coeficientes de determinación (r^2) de cada modelo por distribuidora.

TABLA V. Coeficientes de determinación (r2) por distribuidoras.

Coeficientes por distribuidoras	EDECHI	EDEMET	ENSA
r^2	0.97	0.99	0.99

VI. Resultados y discusiones

La automatización tradicional basada en tareas instructivas y métodos tradicionales para operaciones rutinarias tediosas entre las partes de la red pública es ineficaz para hacer frente a situaciones inesperadas y problemas de sostenibilidad.

El uso de enfoques convencionales para las operaciones eléctricas a través de la programación determinista hace que los problemas de flujo de energía sigan siendo difíciles de controlar. Además, las técnicas de automatización convencionales requieren el restablecimiento del monitoreo manual y la regulación de la operación, lo que genera problemas frecuentes y tiempos de inactividad, especialmente con la incorporación de fuentes de energía renovable.

En este artículo, se ha utilizado un modelo matemático mediante el uso de un sistema de inecuaciones y un modelo de regresión simple para modelar con datos reales las demandas de energía eléctrica para las variables EDECHI, EDEMET y ENSA, las empresas distribuidoras de la producción energética del país.

Al realizar una comparación entre las predicciones realizadas por el modelo de regresión y los valores de prueba se observa una buena precisión de los pronósticos realizados. Lo anterior se verifica con los resultados de los coeficientes de determinación (r^2) generados por los modelos.

La información de generación eléctrica se obtiene del modelo de inecuaciones, la capacidad instalada, la capacidad firme y los valores obtenidos de los modelos de predicción.

VII. Limitaciones del estudio

A pesar de haber consultado diversas literaturas, se pudo observar que los documentos actuales no abordan la creación de modelos para promover la inversión entre países de todo el mundo para construir y optimizar infraestructura y desarrollar continuamente mejores arquitecturas de red, componentes avanzados, monitoreo y modelos de predicción en la producción y demanda de la energía.

VIII. Conclusiones y trabajo futuro

El crecimiento poblacional exige que la infraestructura energética en las ciudades se convierta en un factor sumamente importante, estas ciudades dependen de una red inteligente para garantizar una entrega de energía constante que garantice una sostenibilidad, es decir, sin cortes de energía, al reducir las pérdidas de transmisión y distribución.

Desde el punto de vista de la integración de la generación de energía renovable, es necesario la interacción de las empresas de servicios públicos, los generadores de energía renovable y los usuarios finales, para poder pensar en un futuro en construcciones sostenibles con "enrutadores" de energía, cuyo objetivo es administrar la demanda de energía en tiempo real para ajustar la generación de electricidad. Esto hace que el usuario final, tenga el control del uso de energía, las horas de funcionamiento y los precios.

Se visualiza como uno de los grandes retos el poder obtener modelos más aproximados a la realidad de las redes inteligentes puesto que se prevé que en un futuro cercano la complejidad de la red aumentará. La incorporación de sistemas de comunicación entre las compañías de gestión de la energía y los usuarios finales es necesaria, pero esto puede acarrear otro tipo de vulnerabilidades en la red, como ciberataques o fallos en los sistemas electrónicos, que deben ser evaluadas.

La seguridad energética en Panamá mejoraría con un método sistémico para calcular la capacidad firme en comparación con la metodología actual, según la cual las plantas se analizan individualmente. Invertir en la transición energética estimularía la actividad económica en la fase de recuperación 2020-2024 proveyendo un estímulo neto a la inversión en tecnologías limpias junto con la eliminación de los subsidios a los combustibles fósiles e impulsaría el PIB real un 0,52% más en 2024.

Mediante el uso de los modelos que se han presentado en este trabajo se obtiene la información necesaria para realizar la predicción de generación de electricidad que requieren las empresas productoras. Resulta importante evaluar estos modelos para la optimización, mediante pruebas con datos en tiempo real y a gran escala para cumplir con los requisitos técnicos para operaciones seguras y protegidas del sistema de energía

Actualmente se están estudiando otros métodos para realizar modelos de predicción de la demanda de la energía eléctrica en el país. Aplicar regresión lineal múltiple o redes neuronales a los datos generaría un conjunto de modelos predictivos que resultarían interesantes de estudiar.

Agradecimientos

I.N es apoyada por una beca del Programa de Fortalecimiento de los Postgrados Nacionales de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT-Panamá) en el programa de Maestría en Ciencias en Computación Móvil y E.C es apoyado por el Sistema Nacional de Investigación de Panamá (SNI).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Contribución y aprobación de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

Referencias

[1] D. Lizondo, V. Jimenez, P. Araujo, A. Will, y S. Rodriguez, *Smart Grid and Demand-Side Management Review*. 2017.

[2] F. L. Garcia Estela y A. R. Jimenez Quispe, «Prototipo de red Smart Grid para el control de la energía», 2019.

[3] M. R. Nevárez-Toledo, «Redes Inteligentes y Energías Renovables», *Polo Conoc.*, vol. 5, n.º 8, pp. 1253-1263, 2020.

[4] S. Chemetova, P. Santos, y M. Ventim-Neves, «Load forecasting as a computational tool to support smart grids», en *2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, jun. 2017, pp. 1-6. doi: 10.23919/CISTI.2017.7975781.

[5] J. C. Peña y R. I. I. A. e Innovación, «Métodos de aprendizaje automático para el pronóstico del consumo eléctrico de prosumidores», *Rev. Ii Vol. 13*, ene. 2019, Accedido: 22 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/40899024/M%C3%A9todos_de_aprendizaje_autom%C3%A1tico_para_el_pron%C3%B3stico_del_consumo_el%C3%A9ctrico_de_prosumidores

[6] J. Tello Maita y A. R. Marulanda Guerra, «Modelos de optimización para sistemas de potencia en la evolución hacia redes inteligentes: Una revisión», *DYNA*, vol. 84, n.º 202, pp. 102-111, jul. 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n202.63354.

[7] A. Roozbeh Nia, A. Awasthi, y N. Bhuiyan, «Industry 4.0 and demand forecasting of the energy supply chain: A literature review», *Comput. Ind. Eng.*, vol. 154, p. 107128, abr. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107128.

[8] R. Tang y S. Wang, «Model predictive control for thermal energy storage and thermal comfort optimization of building demand response in smart grids», *Appl. Energy*, vol. 242, pp. 873-882, may 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.038.

[9] «Línea 3 – El Metro de Panamá». https://www.elmetrodepanama.com/linea-3/ (accedido 30 de julio de 2022).

[10] Z. Qadir *et al.*, «Predicting the energy output of hybrid PV–wind renewable energy system using feature selection technique for smart grids», *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 8465-8475, nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.01.018.

[11] S. A. Malik, T. M. Gondal, S. Ahmad, M. Adil, y R. Qureshi, «Towards Optimization Approaches in Smart Grid A Review*», en *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, ene. 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICOMET.2019.8673392.

[12] L. Álvarez *et al.*, «Monitoreo a distancia de centros de transformación eléctrica Smart Grid», presentado en XXII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2020, El Calafate, Santa Cruz)., 2020. Accedido: 18 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103573

[13] A. Ouammi, «Model predictive control for optimal energy management of connected cluster of microgrids with net zero energy multi-greenhouses», *Energy*, vol. 234, p. 121274, nov. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121274.

[14] L. Das, S. Munikoti, B. Natarajan, y B. Srinivasan, «Measuring smart grid resilience: Methods, challenges and opportunities», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 130, p. 109918, 2020.

[15] S. Atef y A. B. Eltawil, «A Comparative Study Using Deep Learning and Support Vector Regression for Electricity Price Forecasting in Smart Grids», en *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, abr. 2019, pp. 603-607. doi: 10.1109/IEA.2019.8715213.

[16] B. M. Fernandes y M. Mestria, «Modelo matemático para o planejamento de agregadores em smart grids», *Proceeding Ser. Braz. Soc. Comput. Appl. Math.*, vol. 6, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2018, Accedido: 18 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://proceedings.sbmac.emnuvens.com.br/sbmac/article/view/2285

[17] L. Chiza y J. Cepeda, «Predicción del Margen de Estabilidad de Corredores de Transmisión Aplicando Criterios de Minería de datos y Algoritmos de Machine Learning», *Rev. Téc. Energ.*, vol. 18, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2021, doi: 10.37116/revistaenergia.v18.n1.2021.466.

[18] M. Nassourou, J. Blesa, y V. Puig, «Robust Economic Model Predictive Control Based on a Zonotope and Local Feedback Controller for Energy Dispatch in Smart-Grids Considering Demand Uncertainty», *Energies*, vol. 13, n.º 3, Art. n.º 3, ene. 2020, doi: 10.3390/en13030696.

[19] M. Massaoudi, H. Abu-Rub, S. S. Refaat, I. Chihi, y F. S. Oueslati, «Deep learning in smart grid technology: A review of recent advancements and future prospects», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 54558-54578, 2021.

[20] F. Pallonetto, M. De Rosa, F. Milano, y D. P. Finn, «Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models», *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 1265-1282, abr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.020.

[21] C. Yang, X. Chen, Y. Liu, W. Zhong, y S. Xie, «Efficient task offloading and resource allocation for edge computing-based smart grid networks», 2019, pp. 1-6.

[22] M. Alazab, S. Khan, S. S. R. Krishnan, Q.-V. Pham, M. P. K. Reddy, y T. R. Gadekallu, «A multidirectional LSTM model for predicting the stability of a smart grid», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 85454-85463, 2020.

[23] M. Xia, H. Shao, X. Ma, y C. W. de Silva, «A Stacked GRU-RNN-Based Approach for Predicting Renewable Energy and Electricity Load for Smart Grid Operation», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 17, n.º 10, pp. 7050-7059, oct. 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3056867.

[24] «Secretaría Nacional de Energía». https://sne.maps.arcgis.com/home/index.html (accedido 22 de julio de 2022).

[25] «SIE». https://siepanama.energia.gob.pa/default.aspx (accedido 22 de julio de 2022).

[26] «CND - Sistema de Información en Tiempo Real», *CND*. https://sitr.cnd.com.pa/m (accedido 5 de marzo de 2022).

[27] Secretaría Nacional de Energía, «Libro Blanco – "Bases para la innovación del sector eléctrico de Panamá" – Secretaría Nacional de Energía». 2021. Accedido: 19 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: http://www.energia.gob.pa/mdocs-posts/libro-blanco-bases-para-la-innovacion-del-sector-electrico-de-panama/

[28] A. D. Kramer, *Fundamentos de matemáticas*. McGraw Hill, 1983.

[29] «- ETESA - Empresa de Transmisión Eléctrica». https://www.etesa.com.pa/ (accedido 24 de julio de 2022).

[30] ASEP, «Electricidad», *Autoridad Nacional de los Servicios Públicos*. https://www.asep.gob.pa/?page_id=72 (accedido 24 de julio de 2022).

Social Media, Emotions and Technology: Identifying Possibilities and Attitudes During the COVID-19 Pandemic

Social Medias, Emociones y Tecnología: Reconociendo Posibilidades y Actitudes Durante la Pandemia COVID-19

Ismael Camargo-Henríquez
Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Panamá, Panamá
ismael.camargo@utp.ac.pa

Yarisel Núñez-Bernal
Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Panamá, Panamá
yarisel.nunez@utp.ac.pa

***Abstract* — The disruption of the COVID-19 pandemic and its multiple challenges tested states, countries, and people. Regarding the latter, information, and communication technologies, together with social media platforms, became a resource that helped to reduce the shortcomings that arose because of the criticality at that moment. However, they also contributed to redirecting the emotional dimensions towards the digital space. This work proposes a novel approach to the case of Panamá, by estimating the emotivity through opinion mining. The study used as a reactive element the official announcements issued by the Ministerio de Salud (Ministry of Health) related to the pandemic. The resulting reactions were recorded for six months through a popular social media platform. The results indicate a strong and negative impact on people's sensitivity. In addition, the data acquisition methods used, their processing, and analysis are provided as valuable contributions to the Latin American context for similar studies.**

Keywords — social media, opinion mining, sentiments, people, data mining, covid-19

***Resumen* — La disrupción de la pandemia por COVID-19 y sus múltiples desafíos, pusieron a prueba estados, países y en particular, a las personas. Para éstas últimas, las tecnologías de información y comunicación acompañadas de las plataformas de social media, pasaron a convertirse en un recurso que ayudó a mitigar las carencias gestadas ante la criticidad del momento. Sin embargo, también apoyaron a redirigir las dimensiones emocionales hacia el espacio digital. Este trabajo, propone un novedoso acercamiento al caso particular de Panamá, estimando la emotividad mediante una minería de opinión. El estudio utilizó como elemento reactivo, los anuncios oficiales emitidos por el Ministerio de Salud relativos a la pandemia. Las reacciones resultantes fueron registradas durante un período de seis meses a través de una popular plataforma de social media. Los resultados indican un fuerte y negativo impacto en la sensibilidad de las personas. Además, los métodos de adquisición de datos utilizados, su procesamiento y análisis, se presentan como contribuciones valiosas al contexto latinoamericano para estudios similares.**

Palabras claves — social media, minería de opinión, sentimientos, personas, minería de datos, covid-19

I. Introducción

El virus causante del COVID-19 ha representado un punto de inflexión en las sociedades y países, en sus estructuras, instituciones y estilos de vida. Su expansión mundial como pandemia desde marzo de 2020, trajo profundos cambios y desafíos en la manera de gestionar situaciones de crisis, en particular, en países emergentes en los cuales los sistemas sociales, económicos y principalmente de salud, son frágiles y están muy fragmentados.

No obstante, ante este escenario, el uso de la tecnología y de las plataformas de social media, pasó a convertirse en un alivio en medio de las incertidumbres de la pandemia. A través de ellas, las personas encontraron inicialmente, un mecanismo para auto informarse [1][2], mantener comunicados a sus seres queridos [3][4], entretenerse [5] y romper la sensación de aislamiento.

Esto condujo a que muchos de los temores, la incertidumbre y el estrés, fueran también manejados virtualmente, convirtiendo las plataformas de social media en un repositorio de opiniones, emociones y sentimientos. Por ejemplo, en ciertos casos, las plataformas ofrecieron un medio para exponer severas críticas a las respuestas de algunos gobiernos para afrontar y controlar la pandemia de forma rápida y eficiente [6] y en otros casos, éstas actuaron como un espacio de desahogo a frustraciones ante la vulnerabilidad que representó para muchas personas la vivencia de ese momento [7].

Aunque en general, no es posible saber cuál ha sido el impacto real de todas estas situaciones, este artículo sostiene que mediante el análisis del comportamiento emocional y del uso de plataformas de social media como Instagram, es posible ayudar a revelar y estimar el peaje que se ha pagado en términos de la emotividad social dentro del contexto de la pandemia de COVID-19.

Particularmente, el planteamiento de este trabajo ha sido desarrollar un estudio preliminar centrado en el potencial de los datos generados por las plataformas de social media, tal que, con éstos se puedan establecer correlaciones interesantes asociadas con incidencias emotivas en las personas como, por

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00045

ejemplo, su salud mental y de qué manera estas afectaciones pueden ser manifestadas en las plataformas de social media ante momentos de tensión o crisis.

Para lograrlo, se propuso un acercamiento basado en la minería de opinión. La idea fue describir ciertas dimensiones emocionales notables que pudiesen ser ponderadas, situando sobre las plataformas de social media, un *"lente"* para extraer estas dimensiones y examinarlas, utilizando técnicas de procesamiento del lenguaje natural (NPL) y minería de datos (DM).

Así, este documento explora a través de un conjunto de datos obtenido a lo largo de un periodo correspondiente entre enero y junio del año 2020, el comportamiento emotivo de las personas. Estos datos se colectaron a partir de los comentarios y opiniones generados en Instagram como plataforma de interés. El ámbito seleccionado como caso de estudio fue Panamá.

De este modo, el artículo muestra en particular, la conducta de los usuarios panameños con relación a la cuenta del Ministerio de Salud de Panamá (MINSA) y de qué manera, los comunicados oficiales de esta institución indujeron reacciones de emotividad en las personas y que tipo de percepciones pudieron ser estimadas. Estas estimaciones, fueron logradas mediante una implementación del algoritmo Naïve Bayes como clasificador [8][9][10][11][12]. Así, el análisis de las opiniones, el procedimiento seguido, bien como los resultados obtenidos, son descritos, presentados y compartidos en este trabajo.

Por consiguiente, las contribuciones subyacentes y la innovación de este estudio son demostrar, primeramente, revelaciones genuinas en estos datos. También, motivar, alentar y apoyar desde el ámbito de la Ciencia de Datos, las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), la potencial pesquisa en otros campos de interés como la Sociología, Psicología o Psiquiatría. Y finalmente, evidenciar la viabilidad técnica de realizar minería de opinión en idioma español y de una manera consecuente y replicable a las realidades de otros países Latinoamericanos.

II. Metodología Desarrollada y Caso de Estudio

A. Contextualizaciones preliminares

El ámbito de este trabajo, así como el diseño experimental ofrecido, intentaron responder las siguientes preguntas de investigación: PI_1: *¿Existe una relación entre las reacciones de las personas en plataformas de social media y la contextualización generada por momentos de crisis como la pandemia COVID-19?* PI_2: *¿Es posible medir y ponderar estas reacciones de emotividad en valores numéricos significativos que expresen el sentir de las personas?* PI_3: *¿Es factible aproximar un espacio de solución a estas mediciones usando minería de opinión en idioma español?*

A la luz de ofrecer respuestas a estas inquietudes, se describen en las secciones siguientes los aspectos iniciales considerados. Al respecto, se exponen, primeramente, los criterios para justificar la selección de la plataforma de social media objetivo. También, se definen los principales componentes teóricos utilizados como base para la experimentación aplicada al caso de estudio, bien como algunas caracterizaciones particulares para su implementación en este estudio.

B. Elección de la plataforma de social media

Como anteriormente se mencionó, el trabajo presentado se remite al análisis de un conjunto de datos colectados en Instagram. Al respecto, el lector podría cuestionar*: ¿Por qué elegir Instagram y no Facebook, Twitter u otra plataforma de social media?*

En primera instancia, en abril de 2022, se estimó que aproximadamente el 31% de la audiencia mundial de Instagram tenía entre 25 y 34 años, esto hace que la plataforma sea especialmente atractiva para los adultos jóvenes [13]. Si bien, según datos recientes [14] hasta enero de 2022 Facebook, continúa siendo la plataforma de social media dominante en el mercado, contando con 2.890 millones de usuarios activos, seguida por WhatsApp y sus 2.000 millones de usuarios. Instagram ocupa un tercer lugar con 1.478 millones de usuarios. Particularmente, todas estas plataformas son propiedad de la empresa Meta. Por su parte, Twitter cuenta con 436 millones de usuarios.

A su vez estos datos fueron contrastados con relación al uso de plataformas de social media en Panamá. Un estudio de 2021 llevado a cabo por la consultora internacional ILB [15] indica que más de 2.4 millones de panameños acceden de manera habitual a plataformas de social media. De éstas, Facebook posee 1.8 millones de usuarios panameños, alcanzando al 55% de la población mayor de 13 años. Con relación a Instagram, un 49% de la población mayor de 13 años es usuaria de la plataforma, es decir, 1.6 millones de panameños visitan de forma habitual esta red social. Por último, notoriamente menos utilizado, encontramos Twitter, donde tan solo el 14% de la población es activa.

Un dato de interés para caracterizar el contexto poblacional del estudio es que el 99% de los usuarios de plataformas de social media en Panamá, accede a estas desde su teléfono móvil y de ellos, tan sólo un 10.8% combina el dispositivo móvil con una computadora para hacerlo [15]. En base a estos datos preliminares y las cifras estimadas, resultó atractiva la exploración de Instagram como plataforma de social media de interés para el presente estudio.

Por otro lado, se consideró también el grado de presencialidad e interacción de la cuenta oficial del MINSA[1] en esta plataforma de social media. Se pudo evidenciar que, en esta plataforma, el MINSA interactúa de forma más frecuente y consistente que, por ejemplo, sus cuentas oficiales en Facebook[2] o Twitter[3].

Esto se comprobó, comparando la cantidad de usuarios o seguidores suscritos a cada una de las plataformas de social media del MINSA. Así, hasta julio de 2022, se observaron 572.222 usuarios en Instagram, para una actividad de 9047 publicaciones. En Facebook se notó la cantidad de 183.845 usuarios sin embargo, su interactividad en términos de publicaciones no pudo ser estimada.

Finalmente, en Twitter, se contaron 234.695 usuarios para 1725 publicaciones. Bajo estas consideraciones cuantitativas, se seleccionó Instagram como la plataforma de social media para realizar este trabajo.

[1] @minsapma

[2] https://www.facebook.com/minsapma/

[3] @MINSAPma

El aspecto técnico también fue llevado en cuenta. Aunque existen experiencias similares ampliamente desarrolladas y documentadas para Twitter [9][16][17][18] la literatura académica explorada, parece indicar que son escasos o poco reportados los estudios asociados a la minería de opinión basada en Instagram. *A priori*, esto podría relacionarse con las siguientes limitantes: (a) la encapsulación de funciones públicas de acceso al contenido de esta plataforma, (b) la carencia de profundización en los niveles de detalle de los datos requeridos, (c) el alto costo de procesamiento de los datos ofrecidos por servicios de consultas o (d) la falta de herramientas consistentes con este tipo de estudios.

En todo caso, esta relativa carencia permitió la posibilidad de extender la pesquisa hacia reimplementaciones técnicas novedosas, de conceptos ya probados que pudieran solventar problemas en tareas como la obtención de datos, su procesamiento y análisis. Estas aproximaciones se describen a continuación.

C. Web Scraping: Aproximando una solución para la adquisición de datos

El Web Scraping, también llamado *Web Harvesting* [19], *Web Data Extraction* [20][21][22] o incluso *Web Data Mining* [23], puede describirse como *"la construcción de un agente para descargar, analizar y organizar datos de la Web de forma automatizada"* [24]. En este sentido, el Web Scraping es una técnica que transfiere y automatiza mediante software, las tareas de extracción, copia y almacenamiento de datos desde su fuente, ejecutándolas de forma mucho más rápida, en tiempo real y de forma más correcta que un esfuerzo humano.

Considerando las dificultades en el acceso a los datos potenciales de la plataforma de Instagram para este estudio, se implementó esta técnica como mecanismo para la adquisición de los datos. También, se respetó la integridad ética del proceso como se sugiere en [25][26][27].

Al respecto, no se extrajeron datos asociados a elementos multimedia de las publicaciones, como imágenes o vídeos, así como tampoco se colectaron las identidades de quienes comentaban las publicaciones. Como resultado, se pudo adquirir en una primera fase, un conjunto de datos de muestra el cual se describe con mejor detalle en la sección III-A.

D. Minería de Opinión: Un enfoque para medir el "sentir" de las personas

En términos generales, la minería de opinión se describe como *"el estudio computacional de las opiniones, valoraciones, actitudes y emociones de las personas"* [28]. Al respecto, es posible ampliar este concepto y describirlo como la aplicación de un conjunto de técnicas de procesamiento del lenguaje natural (NPL) para obtener información de las emociones presentes en textos escritos. Este concepto, llevado a las plataformas de social media, se traduciría en la recuperación de expresiones de emotividad presentes a menudo en comentarios escritos por las personas (usuarios) en relación con alguna publicación.

El concepto de minería de opinión también es conocido frecuentemente como *análisis de sentimientos* y ha tenido una variedad de propuestas de uso en diferentes campos como la valoración de productos [29] o investigación de mercados [30] entre otros. En particular, la minería de opinión hace uso de conceptos de aprendizaje automático para extraer patrones ocultos en grandes volúmenes de datos textuales con el fin de obtener generalizaciones o predicciones en textos.

La estimación de estos patrones se logró mediante la implementación de un algoritmo basado en el teorema Naïve Bayes, el cual se presenta apropiadamente en mejor detalle en [8]. No obstante, se describe de manera general a continuación.

E. El Algoritmo Naïve Bayes: Modelando las emociones de manera cuantitativa

El algoritmo Naïve Bayes es una aplicación directa del teorema homónimo creado por Thomas Bayes (1701 - 1761). El término naïve, se refiere a la premisa central del algoritmo de que los atributos considerados para análisis no están correlacionados entre sí. Por ejemplo, dada una serie de atributos que describen una fruta como *"Manzana"*, con aspectos tales como: *"Roja"* (color), *"Redonda"* (forma) y *"10 cm de diámetro"* (tamaño), el algoritmo no tendrá en cuenta la correlación entre estos factores, sino que tratará cada uno de ellos de forma independiente.

De este modo, supondrá que las características variables (color, forma, tamaño) son todas igual de importantes para el resultado (es o no una manzana). Teniendo esto en cuenta, tomará los atributos y estimará la probabilidad de que la ocurrencia de éstos, definan el objeto principal.

Así, sin gravitar demasiado en los conceptos matemáticos relacionados a los aspectos operativos del algoritmo, los cuales están bien definidos en [8], puede indicarse que su funcionamiento en términos estadísticos permite calcular una predicción. Para esto, el algoritmo define primero una tabla de probabilidades que contiene la frecuencia en la que ocurren los atributos deseados en relación con las variables de salida esperada. A continuación, calcula la mayor probabilidad de ofrecer una solución basada en la frecuencia de los atributos esperados empleando la ecuación (1).

$$P(c|x) = \frac{P(x|c)P(c)}{P(x)} \quad (1)$$

Donde:
$P(c|x)$ es la probabilidad posterior de la clase (objetivo) dado el predictor (atributo).
$P(c)$ es la probabilidad a priori de la clase.
$P(x|c)$ es la probabilidad del predictor dada la clase.
$P(x)$ es la probabilidad a priori del predictor.

En términos de este trabajo, el algoritmo Naïve Bayes, se utilizó para estimar cuantitativamente, la probabilidad de que, dentro del texto de un comentario, existieran palabras con connotaciones negativas o positivas; indicando en menor o mayor grado, la emotividad de dicho texto en relación con un desencadenante, como la publicación asociada (anuncio, noticia, etc.).

Entre las consideraciones evaluadas para utilizar esta implementación, estuvo el aprovechar las múltiples ventajas de este algoritmo como su sencillez de desarrollo, velocidad y su relativamente mayor rendimiento con relación a otros clasificadores (k-nearest neighbor, Case-based reasoning, Decision Tree). Además, Naïve Bayes sólo necesita un pequeño número de datos de prueba para completar las clasificaciones con buena precisión. No obstante, este también se presentó como una solución factible al problema de los

analizadores de opinión basados en idiomas distintos al inglés [31][32][33].

Si bien existen herramientas ampliamente utilizadas como Vader, Flair, TextBlob o NLTK, la implementación de una solución de minería de opinión en idioma español aún no es completa o no se puede efectuar de manera nativa. De este modo, se estructuró un espacio de solución basado en este algoritmo y que se pudo expresar de la forma mostrada en (2).

Algoritmo de entrenamiento basado en Naïve Bayes

```
01  TrainningNB (C, D)
02   V    ← ExtractVocabulary (D)
03   Ndoc ← CountDocs (D)
04   for each c ∈ C do
05    Nc ← CountDocsInClass (D, c)
06    logprior[c] ← log (Nc / Ndoc)
07    text[c] ← ConcatenateText (D, c)
08    for each w ∈ V do
09     Tct ← CountTokens (text[c], w)
10     for each w ∈ V do
11      loglikelihood[w][c] ← Tct + 1 / ∑w' (Tct' + 1)
12  return V, logprior, loglikelihood
```

(2)

Esta reimplementación del algoritmo Naïve Bayes se dividió en dos partes esenciales. La primera, correspondiente al *entrenamiento*, expresada por el pseudocódigo (2) y la siguiente, a la *clasificación* indicada en (3). En el entrenamiento, se proporcionó un *corpus* grande de texto, obtenido desde los comentarios aportados por las personas desde la plataforma de Instagram.

Este *corpus*, denotado como ***D***, computa todos los recuentos necesarios para calcular los términos a identificar como palabras de connotaciones positivas o negativas (clases ***c***). Así, dentro del bucle, simplemente se sigue el orden que se indica en el pseudocódigo. Por ejemplo, en la línea *05* se cuenta el número de texto de ***D*** en la clase ***c***. Luego, se calcula el ***logprior*** para esa clase en particular como indica la línea *06*.

A continuación, se ejecuta un bucle sobre el vocabulario para obtener un recuento total del número de palabras dentro de la clase ***c*** (línea *08*).

Finalmente, se calculan los logaritmos de probabilidad de cada palabra para la clase *c* utilizando el suavizado para evitar errores de división por cero (línea *11*). Una vez realizado el entrenamiento, se obtienen todos los valores necesarios para realizar una predicción.

Esto consistirá simplemente en tomar un nuevo documento ***D*** (no visto) y calcular las probabilidades de cada clase que se ha observado durante el entrenamiento. Para la etapa de clasificación, se introdujo la siguiente derivación algorítmica (3).

Algoritmo de clasificación basado en Naïve Bayes

```
01  ClassificationNB
02     for each c ∈ C do
03        sum[c] ← logprior[c]
04        for each i ∈ testdoc do
05          w ← textdoc[i]
06          if w ∈ V do
07             sum[c] ← sum[c] + loglikelihood[w][c]
08  return sum[c], argmax
```

(3)

Como se puede notar, el algoritmo (3) inicializa el diccionario de sumas el cual almacena las probabilidades para cada clase (línea *03*). Bajo estas condiciones, siempre serán calculadas las probabilidades para todas las clases.

Así, la función comienza haciendo un bucle sobre ellas. Para cada clase ***c***, se suma primero el ***logprior***, el primer término de la ecuación de probabilidad.

El segundo término, requiere realizar un bucle sobre todas las palabras, e incrementando la probabilidad actual por la *log-verosimilitud* de cada una.

Una vez hecho esto, se puede adquirir la clave del valor máximo del diccionario, obteniendo una predicción de ocurrencia de una palabra en el texto del *corpus*.

Traído al espacio de la minería de opinión, el acercamiento propuesto permitiría estimar si la ocurrencia de palabras que se expresen en un comentario tiende a ser negativa o positiva. Para establecer una escala y definir valores asociados a esta polaridad, se estimó que los resultados cercanos a *0.0* indicarían la probabilidad que la opinión sea negativa, por cuanto que, valores cercanos a *1.0* indicarían mayor probabilidad de positividad en la opinión.

III. Resultados y Discusión

A. Adquisición y análisis preliminar de los datos

El estudio examinó una muestra inicial de datos compuesta de 872 publicaciones y 12064 comentarios publicados entre el 1 de enero y el 30 de junio de 2020, utilizando como fuente, la cuenta oficial del MINSA en la plataforma de Instagram.

Esto se indicó previamente en la sección II-B. Por su parte, el acceso y obtención de estos datos, se realizó empleando la técnica de Web Scraping descrita en la sección II-C.

Al respecto del comportamiento de los datos colectados dentro del contexto observado, se notó inicialmente el incremento substancial de las variables *publicaciones* y *comentarios* en los meses evaluados. Los valores preliminarmente observados son descritos por la Fig. 1.

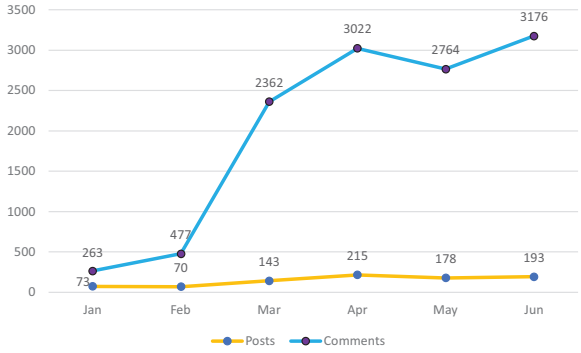


Fig. 1. Evolución de la tendencia entre comentarios y publicaciones generados de enero a junio 2020 en la cuenta oficial del MINSA para Instagram.

En un primer instante, es notable que el número de interacciones entre publicaciones y comentarios es relativamente poca. Esto se debe a que, en los primeros momentos evaluados (enero-febrero), existían publicaciones asociadas a temas de salud variados, no siendo de la atención del público aquellas temáticas coligadas con el COVID-19 o la pandemia.

Sin embargo, la tendencia se hace incremental en la medida en que la línea de eventos subyacentes evidencia para el público, la inminente llegada del virus al país.

De este modo, fue posible identificar estos eventos cronológicos subyacentes y correlacionarlos con el aumento de los comentarios, de acuerdo con la Fig. 1.

Estos eventos se han resumido en la Tabla 1 y de manera muy general, destacan las situaciones del contexto que, en menor o mayor medida, aportaron una reacción emotiva de las personas.

Tabla 1. Eventos relevantes registrados durante el periodo evaluado.

Mes	Evento relevante
Enero	La OMS alerta a los países sobre el COVID-19 y la posibilidad de pandemia.
Febrero	Panamá, declara cuarentena preventiva de 14 días para viajeros nacionales y extranjeros.
Marzo	Se oficializa el primer caso de COVID-19 / Se declara el estado de emergencia en Panamá.
Abril	El estado panameño, declara cuarentena absoluta y restricciones de movilidad.
Mayo	Se toman acciones para la reapertura por fases, de actividades comerciales y de movilidad básicas.
Junio	Las autoridades panameñas, reducen las restricciones y permiten una mayor apertura de actividades / Se mantiene la movilidad reducida.

Así, por ejemplo, el pico en el número de opiniones alcanzado en marzo de 2020 (ver Fig. 1.), se pudo asociar al anuncio oficial de la llegada del virus COVID-19 a Panamá, y la declaración de estado de emergencia. A su vez, en abril de 2020, el incremento de opiniones o comentarios, se correlacionó al confinamiento total del país en una cuarentena nacional y a restricciones de movilidad. De similar modo, la tendencia puede ser aplicada al restante de los meses observados.

Si bien *a priori*, un análisis rápido de los valores colectados indica un interesante comportamiento global de la tendencia (ver Fig. 1) a modo de respuesta a la pregunta de investigación PI_1, estos datos no revelan en profundidad las dimensiones emotivas que actúan sobre esta tendencia.

Por tanto, para determinar dentro del conjunto inicial de estos datos, aquellos valores que fueran significativos y pertinentes al estudio, se estableció un procedimiento de filtrado y clasificación. El procedimiento general es ilustrado por la Fig. 2 y descrito en la siguiente sección.

B. Procesamiento de los datos colectados

Como se describió antes, se analizaron 872 publicaciones y un total de 12064 comentarios. Este primer conjunto de datos corresponde a datos en su forma original ***(A)***, es decir; datos con valores relacionados a temáticas que podrían o no, asociarse con el estudio.

Para acotar la precisión de los datos a analizar, se utilizó una lista de términos o palabras clave que permitieran una búsqueda dentro del conjunto de datos.

Esta lista de palabras clave, se generó a partir de herramientas como Google Trends [34] conformando un vocabulario base de sesenta (60) palabras con términos como *"sars"*, *"covid-19"*, *"virus"*, etc.

De este modo, se extrajo un subconjunto de datos intermedio ***(B)*** con las opiniones emitidas por las personas y que mencionaran una o varias de estas palabras.

Evidentemente con este enfoque, se pueden originar redundancias en las opiniones filtradas, por lo cual se procesaron éstas, eliminando los valores repetidos y obteniendo un conjunto de datos final ***(C)***.

Este último conjunto se consideró la forma más limpia de los datos para analizar mediante el algoritmo Naïve Bayes (ver Fig. 2). Finalmente, los resultados cuantificados se describen a seguir.

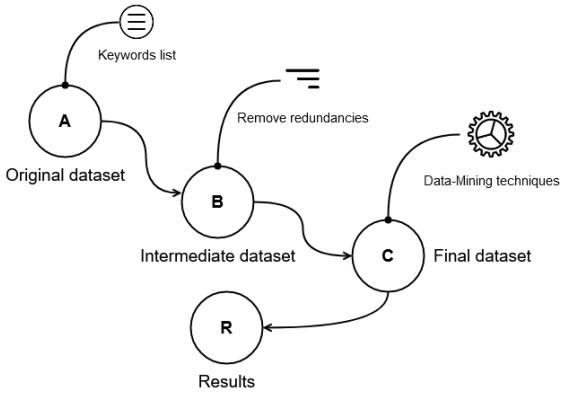


Fig. 2. Flujo de procesamiento de los datos para minería y análisis de opinión.

C. Análisis y hallazgos

Los resultados encontrados son interesantes. Al aplicar el algoritmo Naïve Bayes sobre la colección de opiniones obtenidas en el periodo evaluado, se hace notar que hasta enero de 2020 la emotividad global de las personas suscritas a la cuenta oficial del MINSA en Instagram era alta.

Para esto, hay que considerar que se estableció que valores próximos a *0.0* indican la probabilidad que la opinión sea negativa y valores cercanos a *1.0* revelan mayor probabilidad de positividad.

Así, según mostrado en la Fig. 3, en el primer instante evaluado, la cifra de positividad era del 0.08. Al respecto, se podría aducir que, durante los momentos previos a la pandemia, existieron ciertas manifestaciones de confianza y hasta desinterés por parte del público con respecto al tema.

No obstante, cómo se indica en el mismo gráfico (ver Fig. 3), al iniciar el mes de febrero la percepción positiva decae hasta un 0.04. Si bien, en marzo existe un repunte hacia un 0.05, la línea de tendencia no vuelve a retomar valores nominales altos que indiquen positividad.

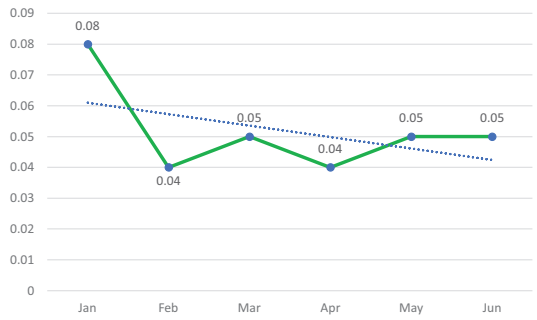


Fig. 3. Estimación de la positividad o negatividad de la emotividad de los panameños durante el periodo evaluado.

Como se mencionó previamente, estos valores podrían correlacionarse con los eventos subyacentes establecidos en la Tabla 1. De este modo, la emotividad medida sería una consecuencia directamente asociada a las situaciones generadas dentro del contexto de la pandemia.

CONCLUSIONES

Este artículo, ha podido describir a grandes rasgos, que el comportamiento emocional mediante el uso de plataformas de social media, puede ser estimado empleando minería de opinión. Para ello, fueron descritas propuestas relativas al abordaje adoptado para la realización de este proceso.

Para el contexto de estudio, se pudo establecer que bajo ciertas situaciones, sí existe una relación entre las reacciones de las personas en plataformas de social media y la contextualización generada por momentos de crisis como la pandemia COVID-19, respondiendo con ello, la primera pregunta de investigación planteada (PI_1).

Así, el trabajo demostró que es posible medir y ponderar estas reacciones de emotividad con valores numéricos significativos que expresen el sentir de las personas, brindado una respuesta al cuestionamiento definido por la PI_2.

Por consiguiente, pudo establecerse, además, que utilizando una reimplementación del algoritmo Naïve Bayes, es factible brindar un espacio de solución para el desarrollo de un clasificador que apoye tareas de análisis de la emotividad en una social media, particularmente, a partir de opiniones en español, ofreciendo por tanto una respuesta afirmativa a la PI_3.

En un acercamiento general, el resultado de este esfuerzo de investigación examinó y evidenció que la población en el ámbito de Panamá fue impactada de manera negativa durante la pandemia COVID-19. Aunque como se declaró inicialmente, esta exploración es apenas experimental en esta fase, sienta las bases para estudios más profundos al respecto, pero dota al mismo tiempo, de las herramientas y componentes necesarios para su replicación en otros contextos y la mejora en esfuerzos futuros.

REFERENCIAS

[1] Y. Li, X. Wang, X. Lin, and M. Hajli, "Seeking and sharing health information on social media: A net valence model and cross-cultural comparison," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 126, pp. 28–40, 2018, doi: 10.1016/j.techfore.2016.07.021.

[2] R. S. D'Souza, S. D'Souza, N. Strand, A. Anderson, M. N. P. Vogt, and O. Olatoye, "YouTube as a source of medical information on the novel coronavirus 2019 disease (COVID-19) pandemic," *Glob. Public Health*, vol. 15, no. 7, pp. 935–942, 2020, doi: 10.1080/17441692.2020.1761426.

[3] M. Yu, Z. Li, Z. Yu, J. He, and J. Zhou, "Communication related health crisis on social media: a case of COVID-19 outbreak," *Curr. Issues Tour.*, vol. 24, no. 19, pp. 2699–2705, 2021, doi: 10.1080/13683500.2020.1752632.

[4] D. A. González-Padilla and L. Tortolero-Blanco, "Social media influence in the COVID-19 Pandemic," *Int. Brazilian J. Urol. Off. J. Brazilian Soc. Urol.*, vol. 46, pp. 120–124, 2020, doi: 10.1590/S1677-5538.IBJU.2020.S121.

[5] J. Feldkamp, "The Rise of TikTok: The Evolution of a Social Media Platform During COVID-19," in *Digital Responses to Covid-19: Digital Innovation, Transformation, and Entrepreneurship During Pandemic Outbreaks*, 2021, pp. 73–85. doi: 10.1007/978-3-030-66611-8_6.

[6] B. Paital, K. Das, and S. K. Parida, "Inter nation social lockdown versus medical care against COVID-19, a mild environmental insight with special reference to India," *Sci. Total Environ.*, vol. 728, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138914.

[7] T. Bonsaksen *et al.*, "Loneliness and Its Association With Social Media Use During the {COVID}-19 Outbreak," *Soc. Media + Soc.*, vol. 7, no. 3, 2021, doi: 10.1177/20563051211033821.

[8] D. P. Berrar, "Bayes' Theorem and Naive Bayes Classifier," 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.20473-1.

[9] C. Villavicencio, J. J. Macrohon, X. A. Inbaraj, J.-H. Jeng, and J.-G. Hsieh, "Twitter Sentiment Analysis towards COVID-19 Vaccines in the Philippines Using Naïve Bayes," *Information*, vol. 12, no. 5, 2021, doi: 10.3390/info12050204.

[10] M. Wongkar and A. Angdresey, "Sentiment Analysis Using Naive Bayes Algorithm Of The Data Crawler: Twitter," in *2019 Fourth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICIC47613.2019.8985884.

[11] H. Zhang and D. Li, "Naïve Bayes Text Classifier," in *2007 IEEE International Conference on Granular Computing (GRC 2007)*, 2007, p. 708. doi: 10.1109/GrC.2007.40.

[12] B. Seref and E. Bostanci, "Sentiment Analysis using Naive Bayes and Complement Naive Bayes Classifier Algorithms on Hadoop Framework," in *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2018, pp. 1–7. doi: 10.1109/ISMSIT.2018.8567243.

[13] S. Dixon, "Instagram: Age distribution of global audiences 2022," *Statista*. May 2022. [Online]. Available: https://www.statista.com/statistics/325587/instagram-global-age-group

[14] S. Dixon, "Biggest social media platforms 2022," *Statista*. Jul. 2022. [Online]. Available: https://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networks-ranked-by-number-of-users/

[15] ILB-Consultora, "¿Cuáles son las redes sociales más usadas en panamá en 2021?," *ILB*. 2021. [Online]. Available: https://ilifebelt.com/cuales-son-las-redes-sociales-mas-usadas-en-panama/2021/01/

[16] T. Mustaqim, K. Umam, and M. A. Muslim, "Twitter text mining for sentiment analysis on government's response to forest fires with vader lexicon polarity detection and k-nearest neighbor algorithm," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1567, no. 3, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1567/3/032024.

[17] C. R. Machuca, C. Gallardo, and R. M. Toasa, "Twitter Sentiment Analysis on Coronavirus: Machine Learning Approach," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1828, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1828/1/012104.

[18] J. F. Raisa, M. Ulfat, A. Al Mueed, and S. M. S. Reza, "A Review on Twitter Sentiment Analysis Approaches," in *2021 International Conference on Information and Communication Technology for Sustainable Development (ICICT4SD)*, 2021, pp. 375–379. doi: 10.1109/ICICT4SD50815.2021.9396915.

[19] P. A. Johnson, R. E. Sieber, N. Magnien, and J. Ariwi, "Automated web harvesting to collect and analyse user-generated content for tourism," *Curr. Issues Tour.*, vol. 15, no. 3, pp. 293–299, 2012, doi: 10.1080/13683500.2011.555528.

[20] E. Ferrara, P. De Meo, G. Fiumara, and R. Baumgartner, "Web data extraction, applications and techniques: A survey," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 70, pp. 301–323, 2014, doi: 10.1016/j.knosys.2014.07.007.

[21] J. Myllymaki, "Effective Web Data Extraction with Standard XML Technologies," in *Proceedings of the 10th International Conference on World Wide Web*, 2001, pp. 689–696. doi: 10.1145/371920.372183.

[22] M. A. Bin Mohd Azir and K. B. Ahmad, "Wrapper approaches for web data extraction : A review," in *2017 6th International Conference*

on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEEI.2017.8312458.

[23] B. Singh and H. K. Singh, "Web Data Mining research: A survey," in *2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, 2010, pp. 1–10. doi: 10.1109/ICCIC.2010.5705856.

[24] S. vanden Broucke and B. Baesens, "Introduction," in *Practical Web Scraping for Data Science: Best Practices and Examples with Python*, Apress, 2018, pp. 3–23. doi: 10.1007/978-1-4842-3582-9_1.

[25] J. K. Hirschey, "Symbiotic relationships: Pragmatic acceptance of data scraping," *Berkeley Technol. Law J.*, vol. 29, pp. 897–927, 2014, doi: 10.2139/ssrn.2419167.

[26] R. O. Mason, "Four Ethical Issues of the Information Age," *MIS Q.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–12, 1986, doi: 10.2307/248873.

[27] B. Ives and V. Krotov, "Anything you search can be used against you in a court of law: Data mining in search archives," *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, vol. 18, no. 1, p. 29, 2006, doi: 10.17705/1CAIS.01829.

[28] B. Liu and L. Zhang, "A Survey of Opinion Mining and Sentiment Analysis," in *Mining Text Data*, 2012, pp. 415–463. doi: 10.1007/978-1-4614-3223-4_13.

[29] Rahul, V. Raj, and Monika, "Sentiment Analysis on Product Reviews," *2019 Int. Conf. Comput. Commun. Intell. Syst.*, pp. 5–9, 2019, doi: 10.1109/ICCCIS48478.2019.8974527.

[30] M. Rambocas and B. G. Pacheco, "Online sentiment analysis in marketing research: A review," *J. Res. Interact. Mark.*, vol. 12, no. 2, pp. 146–163, 2018, doi: 10.1108/JRIM-05-2017-0030.

[31] V. Barriere and A. Balahur, "Improving Sentiment Analysis over non-English Tweets using Multilingual Transformers and Automatic Translation for Data-Augmentation," *CoRR*, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2010.03486.

[32] D. D. Londhe, A. Kumari, and M. Emmanuel, "Challenges in Multilingual and Mixed Script Sentiment Analysis," in *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418087.

[33] S. Poria, D. Hazarika, N. Majumder, and R. Mihalcea, "Beneath the Tip of the Iceberg: Current Challenges and New Directions in Sentiment Analysis Research," *IEEE Trans. Affect. Comput.*, 2020, doi: 10.1109/TAFFC.2020.30381.

[34] G. Inc, "Descubre qué está buscando el mundo," *Google trends*. Google, Mar. 2022. [Online]. Available: https://trends.google.es/trends/?geo=PA

Design and implementation of a Framework for remote experiments in education

Pavel Kuriščák
Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Laboratory of General Physics Education
Prague, Czech Republic
kurispav@fjfi.cvut.cz

Pedro Rossa
Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Lisbon, Portugal
pedro.rossa@tecnico.ulisboa.pt

Horácio Fernandes
Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Lisbon, Portugal
hf@ipfn.ist.utl.pt

João Nuno Silva
Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, INESC-ID Lisboa
Lisbon, Portugal
joao.n.silva@inesc-id.pt

***Abstract*—— Remote Controlled laboratories are a teaching and learning tool that increasingly becomes fundamental in the teaching and learning processes at all levels. A study of available systems highlights a series of limitations on the used programming languages, overall architecture, and network communication patterns that hinder these systems to be further adopted. Current technologies and modern WEB architectures allow the resolution of such limitations.**

Here we present the FREE (Framework for Remote Experiments in Education) platform, a novel system, that, using modern technologies, architectures, and programming practices, will be easier to integrate with external tools and services and new experiments. FREE was developed in Python, Django web framework, HTML, JavaScript, and web services to simplify the development of new functionalities. The designed architecture provides a loose coupling between the infrastructure and the remote experiments facilitating further developments and allowing new experiment integrations. Currently FREE is already running in various countries providing access to about five types of, integration with various Learning Management Systems and External Authentication. Using FREE the development and integration of new experiments (independently of their hardware and programming language) is now easier.

Keywords—remote laboratories, LMS, web applications

I. INTRODUCTION

Remote controlled laboratories (RCL) have been used in teaching various fields of engineering and sciences but COVID-19 and the requirement for remote learning have given a boost to their use, visibility for its need and usefulness.

With RCLs students can access laboratory apparatus and execute experiments deployed and configured in remote locations. Access to these remote-controlled laboratories is performed using a regular PC either using specific desktop applications or a simple web browser. The experimental apparatus can be configured before the start of the experiment execution or while the experiment is executed. On the physical location where the experiment is installed, a server allows and controls access to the physical apparatus.

The access to remote experiments further enriches the students' learning, by providing access to resources and practical knowledge that otherwise was inaccessible. The use of a controlled interface for the setup of the experiments also facilitates the operation and the knowledge of the various experiment parameters.

This work was funded by the Erasmus+ program from the EU under the grant agreement 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP and by national funds through FCT, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, under project UIDB/50021/2020.

Remote controlled laboratories or single experiments were already used before COVID but the pandemic and the resulting teaching and learning adjustment made this type of learning activity more relevant. Even with the return to normal classes the need and advantages of the use of remote-controlled laboratories remain.

Most of the current RCLs provide access to experimental apparatus that are not available or easily operated by schools due to cost and operation specifications, but some of the widely available experiments that students access in schools' laboratories can be easily converted to allow remote access. This adaptation not only facilitates the executions (in space and time) but also allows its integration into Learning Management Systems such as Moodle or Canvas.

This possible widespread use of remote experiments is in part limited by the available computational infrastructures to deploy and make RCLs available. A simple survey of the existing remote-controlled laboratories infrastructures proves these systems' architecture and implementation technologies make the widespread use and addition of experiments a challenging task. Some of the systems are monolithic with the available experiments hardcoded into the system, some others require the installation of specific software on the students' computers hindering its use.

With these challenges in hand, we present here a new open architecture for the implementation of remote-controlled laboratories or experiments: the Framework for Remote Experiments in Education (FREE). FREE is being developed from the ground up, and a set of requirements, drive the project decisions. One of the main requirements is the ease of integration of new experiments. This should be accomplished by the definition of a clear and easily replicable code structure, a clear separation between components, and a set of well-defined Interfaces (network and programmable). The code structure will allow a simple development of the FREE components that will implement the User Interface, the clear separation of components and the interface will allow the use of the most suitable programming languages for the implementation of the experiments. The second requirement is the possibility to integrate the developed systems (and available experiments) into external services, such as remote authentication, use in LMS, or even federated authentication. This requires the adoption of a programming framework that provides extensible and suitable libraries.

A FREE system is a web application running on a server, the user interface is accessed through a web browser and the experimental apparatus are remote processes. The openness in the proposed system comes from the definition of a set of software components that allows the simple definition of new experiments and a set of well-defined interfaces (both for programming the interactions and performing

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00046

communication). The communication between the UI (User Interface), Server, and Apparatus is based on HTTP, JSON, and REST APIs.

The FREE architecture is already implemented in a system that allows access to remote experiments. It is extensible with respect to the number and type of experiments and integration with various authentication mechanisms. Users can access various remote experiments using a regular browser and accessing a single server. After authentication with one of the widely available services (for instance Google or Microsoft), the user can configure and execute any of the available experiments. During the experiment execution, a video feed and the results are shown to the student in real-time. After the execution, the user can access and download all the results.

The implementation and addition of new experiments are facilitated by the modularity of the User Interface and the communication protocol between the FREE and the experimental apparatus. The definition of the interface is accomplished by the implementation of simple HTML whose input fields correspond to the parameters of each execution. The steps to verify the values and control the executions are generic to all types of experiments. The FREE interacts with the experimental apparatus using a simple communication protocol. The apparatus polls the FREE for new execution, and, when a new execution is to be started, the data retrieved from the HTML interface is transmitted to the apparatus. During the experiment execution, the apparatus sends partial results to the FREE server that forwards them to the web page.

The current version of FREE was implemented in python and several types of experiments are now ported to it. The programmers of the new experiments write minimal HTML and JavaScript (for the interaction with the user) and only need to implement simple Request-Reply protocols (with a limited number of interactions) on the experiment apparatus.

The remaining of the paper is organized as follows, Section II presents and describes existing systems, highlighting their main functionalities, and limitations. The following chapter describes the requirement architecture and implementation of the proposed RCL infrastructure. Chapter IV presents and validates the usage of FREE. The document terminates with a conclusion and brief description of future work and development possibilities.

II. Remote Controlled laboratories

A. Publicly available remote-controlled laboratories

The major work in RCLs has been done in the engineering areas, but there are some systems applied to life sciences. Most of the publicly available laboratories provide experiments in physics, mechanical, electrical engineering, or even computer science [1]. These laboratories and experiments use various actuators to control physical processes and sensors to retrieve relevant results. Their architecture includes a web-based user interface so that a user with a web browser and internet access can configure/control the experiment and retrieve the results.

Currently, some remote experiments are available for any user to access through the internet. Any user can configure, run them, and see the results on the following platforms: LabsLand [2], RELLE [3], ISE [4], elab [5], or Unilabs [6]. Most of these remote-controlled laboratories list the available experiments on a simple web page. Only a few aggregate the experiments into a portal (LabsLand, elab, and Unilabs).

In LabsLand the authentication can be provided by a school after which the user has full access to the selected experiments, or using a trial Google account supplying access to a limited number of experiments executions. In elab, users can use the authentication provided by two Moodle installations or run the experiments as anonymous users. In Unilabs users can create a free account to access the Moodle contents and the available experiments. In all other, users have full access to all the available experiments.

In most systems, each remote experiment is presented on a web page, where the user controls a physical apparatus to execute the experiment. The way the user controls the physical experiments differs a bit between the various systems but follows the generic experiment control [7] pattern: define experiment parameters, start an experiment, see the experiment video stream, and see results.

In some systems, the user must previously reserve a time slot in which the user has exclusive control of the experiment. Most systems use a web-browser to allow users to control the experiment. Elab is the only system that requires the user to download a Java application that will present the user interface. Besides the control and visualization of the experiment, only in elab are the users allowed to download the results in a tabular (CSV file) form. In all other systems, the user can only see a plot with the results.

Unilabs offers a set of remote and virtual laboratories, mediated by Moodle. Access to the experiments is done by navigating a Moodle site. Some experiments are freely accessible, while others are integrated into a course and require account creation and course enrollment.

B. Computational infrastructures

The work here presented is focused more on the supporting infrastructure than on the functionalities offered to the users, so it is important to understand how the architectural and technological decisions made on existing systems affect the quality of the supporting infrastructure. This section will present a detailed view of the internals of the elab, RELLE [8], WebLab-Deusto [9] (supporting infrastructure of LabsLand), REMLABNET [10] supporting library (used to implement ISE), and other isolated research works [11, 12, 13, 14]. Unilabs is based on Moodle modules, and although there is no specific documentation to implement a new remote experiment, it is possible to infer its architecture and programming requirements.

1) Architecture

The various supporting software systems presented here follow a generic architecture with 4 main components: User Interface (**UI**), **Portal**, the **Global Control**, and the specific **Experiment Control**, as illustrated in Figure 1. The **Portal** and **Global Control** usually run on a server and manage the various available experiments, user authentication and authorizations, and execution queues and reservations. **Experiment Control** is the low-level code that controls the physical experiment, sets it up, starts execution, retrieves the sensor data, and sends it to the server. The **UI** presents the user with the available experiments (provided by the **Portal**) and shows the **Experiment Control** and results.

The various supporting systems implement this architecture in diverse ways, and with different usability levels. The RELL implements one variation of this generic architecture, with no **Global Control**. Right after the user

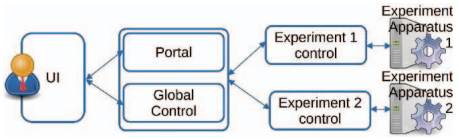


Figure 1 - RLC generic architecture

selects one experiment on the **Portal**, all the interaction is done directly to the **Experiment Control**. This part is running in the microcontroller/raspberry pi directly attached to the physical experiment. The REMLABNET does not implement the **Portal** and **Global Control** has limited functionalities. Each experiment is a different implementation of the **UI**, **Global Control** and **Experiment Control**. The **UI** is implemented using WEB technologies and the experiment's control runs on a different computer from **Global Control**. REMLABNET allows two different interactions between the user **UI** and the experiments.

In REMLABNET and RELLE, regular users' browsers connect directly to the computer attached to the physical experiment. This solution is simpler than one with a **Global Control** module, but it is less secure and reduces the integration and services offered to the users. Only in isolated experiments [12, 13], this type of architecture can be practical.

Both WebLab-Deusto and elab implement the 4 components and distribute them in the best way. The **UI** executes on the user computer, both the **Portal** and **Global Control** execute on the server and each Experiment has its own **Experiment Control**. The **Experiment Control** can run on a different computer attached to the Experiments and communicate with the server through a specific API/message. elab implements the **Portal** using Web technologies, allowing its access using a regular browser, but to execute any experiment it is necessary to install a Java application. In the WebLab-Deusto **Experiment Control** can be hosted inside the whole infrastructure not requiring a different computer or processes.

Unilabs is supported by Moodle which offers some of the **Portal** and **Global Control** functionalities. The **UI** of Unilabs is web-based. Since there is no specification for the **Experiment Control** modules, these can be placed in remote computers local to the Moodle server, depending on the particularities and experiment deployment.

2) Communication protocols

To allow remote access to the physical experiments these components are distributed in diverse ways and communicated between them using different network protocols.

In RELLE and REMLABNET the communication between the user computer and the **Experiment Control** simply uses HTTP and HTML. The Experiment Control, the computer or raspberry Pi directly attached to the physical experiment, should implement a regular web server to supply the **UI** and answer the user requests.

Elab uses CORBA [15] to implement communication between the various components: **UI**, **Global Control** and **Experiment Control**. WebLab-Deusto uses regular HTTP/HTML to perform communication between the browser and the server. The interaction between the server and the **Experiment Control** is done using HTTP/REST methods. In these two systems, the **Experiment Control** (running close to the experiment) receives requests and commands from the server. Since it is the server that contacts the **Experiment Control** on a remote computer, the server needs to know the exact network location of the **Experiment Control**. This solution, as in the RELLE and REMLABNET, may require complex network configuration.

For Unilabs there is no specific protocol to be used, so the communication between the Server (**Global Control**) and the **Experiment Control** (if existing in a remote computer) can be implemented using any Internet base technology or protocol and be different for each experiment.

3) Programming language and environment

Elab uses JAVA as the main language for the **Global Control**, **UI**, and **Experiment Control**, and uses the language supporting features for the graphical elements. The communication between components can be programmed using CORBA allowing some sort of programming uniformity between components implemented in different languages. To implement a new experiment, **Experiment Control** can use any language if it supports CORBA

REMLABNET uses either Java or PHP for the development of the Experiments control modules. Since there is no public documentation, it is hard to understand the complexity and effort to integrate or develop new components.

RELLE remote experiments can be implemented using any server-side language: the whole interaction with the user is directly done using the browser and no communication needs to be done with the **Portal**. Experiment registration is done via a web page on the **Portal** part, with the insertion of the experiment data (name, description, type, location, …).

The WebLab-Deusto is implemented in Python using the Flask [16] framework, and SQL Alchemy [17] for database access. There are two distinct types of experiment implementations: managed and unmanaged. In the case of managed Experiments, the **Experiment Control** is integrated into the server and can be implemented in python or any other programming language that supports XML-RPC. If implemented in python the local method calls are used to interact with the experiment, while in other languages, XML-RPC is used. Unmanaged are external processes that implemented a web service to receive commands from the server. These commands will be generated in the **UI** (JavaScript running in the browser) and sent to **Experiment Control** or generated by **Global Control**.

Although these commands can be specific for each experiment, there is a set of pre-defined ones: experiment start, experiment delete, send data to experiments, send command to experiments, and retrieve experiment status. To implement a new experiment, it is necessary to implement the **Experiment Control** and create specific configuration files before its registration on the server.

The module components for UNILAB should follow the Moodle specifications and be implemented in PHP. The user interface for the experiment's control can be implemented in JavaScript [18]. All experiment data are stored in Moodle database, being available for later processing or use.

Only WebLab-Deusto is open source. Others' documentation doesn't give any information on how to access, use or install their source code.

4) External services

Some of these systems are supported by external authentication and Learning Management Systems. These two integrations allow ease of user management and facilitate the user's access to the experiments. The Integration with LMS further allows the development of customized exercises dependent on the execution of the experiments.

Concerning authentication, only WebLab-Deusto allows the use of remote authentication services (such as Google or Microsoft). In this system users do not need to create a new account; they just need to use their cloud service credentials. This is an advantage for the users that do not need to define and memorize a new username/password, but also for the remote-controlled laboratory administrators that do not need to manage and secure user's passwords.

WebLab-Deusto, REMLABNET, and Unilabs are integrated into Moodle, allowing the development of courses that require the execution of remote experiments. WebLab-Deusto and REMLABNET [19] use LTI [20] to perform the integration with Moodle. Here these systems implement a set of endpoints that are called from the LMS. Users seamlessly access content locally to the LMS and the remote experiments. The other systems require the development of specific MOODLE activity modules. The programmer needs to implement a library and set of classes (following a MOODLE specification) using PHP and JavaScript. In small-scale systems such as Laborem [14] this solution may be adequate, but for large-scale systems is limiting

C. Limitations

From our point of view, none of the available systems provides all the requirements and functionalities of a modern, easy-to-integrate, and extensible RCL. All of them present some characteristics that can be further improved. Since the first goal was to re-use or implement a new remote-controlled laboratory system, these limitations and deficiencies should be found. The existence of a **Portal** and **Global Control** that mediates all the interactions between the user and the remote experiment is a security requirement that must be implemented. RAMLABNET and RELLE require the client browsers to contact directly with **Experiment Control**. This poses a big security threat for every experiment and requires a complex network and firewall configuration.

With respect to programming languages, it is obvious that nowadays the use of Java (in elab) is a major limitation. Concerning the overall architecture, it is our understanding that **Global Control** and **Experiment Control** should be separated with the possibility to be executed on a different computer. WebLab-Deusto and elab clearly enforce this.

For communication protocols, the major drawback of the presented solutions refers to the direction of communication between the remote **Global control** (running on the server) and the **Experiment control**. In WebLab-Deusto and elab it is the server that initiates communication with the **Experiment Control**. This requires that an experiment installed in a different network or institution has a public address (so that the **Experiment Control** can contact it) or a VPN needs to be used. This approach not only requires complex network configuration but also decreases security.

The integration with the remote authentication mechanism should also be taken into consideration when supplying a **Portal** to access the experiments. WebLab-Deusto is the only one that offers such functionality: gateway4labs [21] (external system that supplies LMS interoperability functionalities by implementing LTI [20]), but at the expense of an added layer of complexity. The integration with Moodle using specific modules (such as in Unilabs and Laborem) limits the interoperability with other LMS.

III. The Framework for Remote Experiments in Education

This chapter describes the implementation of the FREE (Framework for Remote Experiments in Education), a novel remote-controlled laboratory management system, by first listing the global requirements that guided the technological decisions. After the presentation of the Architecture and Data Model of our solution, the technical implementation details and decisions are presented.

A. Requirements

The general functional requirements that FREE implements are those common to most of the Remote Controlled Laboratories management systems: (R1) it should allow users to control an experiment that is in a remote location; (R2) users should use a browser without installing any other software; (R3) users should have access to various experiments on the same portal; (R4) the user should be able to configure the selected experiment; (R5) users should see video and results of the experiment execution in real-time; and (R6) users should have access to past results.

With respect to the operation of the experiments system, the following requirements were set: (R7) experiment control (from Figure 1) should not have a public address nor be accessible from the Internet; (R8) one Apparatus can supply several types of related experiments for the user to execute; and (R9) replicas of the same experiment can be provided by multiple apparatus installed in multiple locations.

Another set of concerns and requirements is related to the integration with external components and programming of new features or experiments: (R10) FREE should allow the integration of multiple authentication methods; (R11) FREE should be interoperable with available LMS; (R12) Adding new experiments should not require the programming and changes on the FREE server; (R13) the code structure in the FREE server should be well defined and standardized; and (R14) the interface implemented by FREE server should be well defined and allow the interoperability with Experiment Controls implemented in multiple programming languages.

B. Architecture and data model

FREE follows the generic architecture presented in Figure 1, with its 4 main components presented in Figure 2: UI is presented to the user through the browser, and the server will implement a portal with a list and provide access to all the experiments. The server will also handle the global control of all the experiments (scheduling of execution, access control, results management, …) and the Experiment Control will be placed on a computer close to the Experiment apparatus.

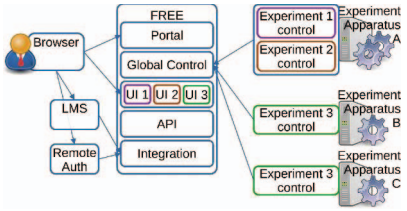


Figure 2 - FREE detailed architecture

The first significant difference from the existing solutions is the capability of an Experiment Apparatus to be able to execute different Experiments (as illustrated with the Apparatus A that can execute Experiments 1 and 2).

The second fundamental difference (fundamental to fulfill R7) lies in the communication between Experiment Control and the FREE Server. In FREE the server never starts communication with the remote Experiment Control, it is always the other way. This reduces the complexity of network configurations and increases the security of the experiments. This also simplifies the development of Experiment Control (it is a simple client) and its deployment without the need to previously defined the Experiment control network address.

All the user interaction is programmed using web technologies: a backend server and HTML/JavaScript/REST on the browser. The generic parts of the UI (portal, authentication, list of executions, and results) are common to all the experiments, but it is necessary to define specific forms (for the creation of experiments) and results visualization for each experiment. This is carried out with the development and installation of specific modules for each experiment. These modules have the specific HTML and JavaScript that are presented to the user.

In the interaction between the User (UI) and the Experiment Control/Apparatus) the FREE Server acts as a simple Proxy. It receives from the browser the data corresponding to the configuration of the Experiments and forwards it unprocessed to the Apparatus when asked. The flow of the results is similar, during the experiment Execution, the Apparatus sends periodically the results to the FREE Server that stores them unmodified in the database. The JavaScript in the browser requests those results, and formats and presents them to the user. The FREE Server is completely agnostic to the format of the Experiment configuration and Execution results. These can be JSON or XML that is produced and processed only by the JavaScript of the UI and by the Experiment Control.

FREE implements two more modules to allow its interaction and integration with the remote components and systems. The API (Application Program Interface) module will allow the Experiment Control processes to retrieve the experiments to be executed and supply status and results. The Integration Module will allow the use of external authentication methods (from Google, Microsoft, or others) and the integration of the existing experiences into LMSs.

Figure 3 presents the data model implemented by FREE. This diagram represents the database tables of all the necessary information: the various connected apparatus, the available experiments, the executions and the results. For simplicity, the specific attributes of each class are not presented here.

The top-level data types implemented by FREE are the Apparatus Types and Protocols. The apparatus type corresponds to the several classes of physical hardware that can be connected to FREE. For instance, in Figure 2 two

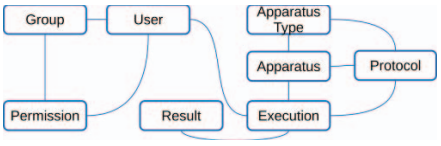


Figure 3 – FREE database model

distinct types of Apparatus exist: the one that implements the red and maroon experiments and the one that implements the green experiments. The second level datatype is the protocol that allows the representation of the available experiment types. In the previous examples, there are 3 different protocols, corresponding to three distinct types of experiments.

This data modeling decision complemented by the decoupling of the Experiment Control from the FREE Server allows each Apparatus (the physical hardware in the laboratory) to implement one or various Protocols and the existence of multiple similar apparatus that implement the same Protocol (requirements R8 and R9). Figure 2 shows 3 apparatuses that implement 3 distinct types of experiments.

Users can belong to groups that give them access to various permissions of administration or experiment accesses. When defining an experiment execution, the user selects one Apparatus, one of the Protocols implemented by such apparatus, and defines the initial execution parameters. After the execution is created, the Apparatus will retrieve its configuration, execute it and send to FREE the Results.

Each protocol record will store not only the specific Apparatus configuration but also the initial configuration that should be provided by the user. The Execution and Results records will store all the relevant information about each experiment execution: its type (Protocol) what Apparatus was executed at, the initial parameters, and all the results. Besides this data, FREE also associates to each Protocol and Apparatus the necessary HTML and JavaScript code to implement the UI on the user browsers.

C. Implementation

To satisfy the requirements R10, R11, R12 and R13, a suitable programming language and framework should be selected. From a study of the existing programming languages and corresponding frameworks, the selected ones were Python and Django. The use of this combination provides a set of advantages for the development, maintenance, and evolution of the FREE project.

Python is a widely used language with a large programming base. The number of proficient programmers in this language is continuously growing, guaranteeing the manpower to evolve the system in the future. The selection of Django instead of other options (such as Flask) was decided to take into consideration its well-defined project structure and the considerable number of available libraries. The use of Django also allows the choice of any database backed that best suits the infostructures where FREE will be installed. Different FREE installations will be able to use different database systems (MySQL, Microsoft SQL Server, or any other supported by Django) with minimal FREE configuration. Django also offers simple and efficient mechanisms to upgrade and install new code in existing installations.

1) API

To fulfill requirements R7 and R14, it was decided to implement the FREE interface based on REST web services. In FREE, it is the Apparatus that initiates all interaction with the FREE server. Each Apparatus calls the provided endpoints to retrieve experiments and supply results and status. For the UI, besides static pages that show the Apparatus, and protocols static information and forms, the creation of

Figure 4 - Administrative forms - configuration of a protocol

experiments and retrieving of results is done by JavaScript REST calls to the implemented web service.

The REST API endpoints for the interaction between the browser and FREE server are summarized as follows: creation and manipulation of experiments, retrieving a list of all results for the execution, retrieving the recent results for a given execution, starting a previously configured execution, and retrieving of the status of a given execution. For the interaction between Apparatus and the FREE server, the following REST endpoints are available: change a given execution status, notify the system that the Apparatus is alive, retrieve the next execution to be executed, send to the server execution results, retrieve configuration about an apparatus.

This is the minimum set of endpoints that allows the selected type of interaction: the users can configure, execute, and see the results of experiments, and the **Experiment Control**, can get specific configurations, and send to the server the status and results. These endpoints process, store, and read the information on the database.

To identify remote users and Apparatuses and to guarantee access control, modern techniques, such as security tokens and secrets, are implemented.

In the definition of an experiment configuration and processing of results, the FREE Server is completely transparent to each experiment data, it only stores and forwards this information. The processing of this information is only done in the JavaScript code in the UI and on the Experiment Control next to Apparatus. The use of REST endpoints further simplifies the development and integration of new experiments with no changes to the infrastructure and using different programming languages on the browser or on the Experiment Control (R14). Additional endpoints can be added to implement new functionalities, such as experiment reservations or control during the experiment execution.

2) Experiments

To create a new experiment and integrate it into FREE it is necessary to follow three steps: (i) implement the Experiment Control that will call the previously presented endpoints to interact with the FREE server, (ii) define the UI and (iii) insert the relevant data into the FREE server database.

In the creation of the UI, the programmer does not need to write any python server code, he only needs to define the HTML elements that will allow the insertion of the experiment configuration and write the JavaScript code to show the results on the web page. This is done in a template file that will hold all the supporting HTML and JavaScript code. The programmer needs to design a simple HTML form (specific for that experiment configuration), and a DIV with the tables and plots to be filled with the results. The programmer also needs to write the JavaScript code that should be executed whenever a result is received from the server. This code receives the results in tabular form as formatted by the Control Experiment, converts them and updates the plots previously designed. This file should be placed in a specific directory in the FREE Server.

Each type of Apparatus, type of experiment and specific physical apparatus requires the insertion of specific information on the database. This is done in the Django-provided Administration interface, as illustrated in Figure 4. The FREE administrator should create one new entry in the Apparatus Type (corresponding to the characteristic of the specific physical Apparatus) and an entry in the protocol table. After this, it is possible to create a new entry corresponding to the specific Apparatus.

The implemented API, the FREE Server organization and these installation steps allow the creation of new experiments without changes to the FREE Server Code (R12). Furthermore, the code necessary for the integration of a new experiment is limited in the number of lines of code and complexity.

3) Services and libraries

Besides the easy integration of new experiments, FREE should also allow its easy integration with existing external services such as authentication services or Learning Management Systems (requirement R10 and R11). This integration was eased by the selection of programming language and framework. Django already offers libraries that completely hide the implementation details and implement all the interoperability mechanisms.

In FREE, the integration with existing authentication services (such as Microsoft, Google, or other specific university authentication) is carried out using the OAuth [22] protocol, an industry standard that with a suitable client library only requires a small configuration. In FREE the social-Django [23] library is used to activate the OAuth protocol, this library takes advantage of the user management embedded in Django, and with a simple configuration, the authentication for Microsoft or Google services can be activated.

Another integration that was considered fundamental and already implemented was with external Learning Management Systems (LMS) such as Moodle. To do this we selected the use of the industry standard LTI [20], by using the *django-lti-provider* [24] library it is now possible for Moodle (or any other LMS) to redirect users to FREE to execute any experiment. After being redirect to FREE, users will be automatically logged in without requiring any further credentials. The LTI protocol handles and transfers user credentials and all complementary user information.

FREE also supports the streaming of video from the apparatus to the user browser (requirements R5). This is carried out using WebRTC [25] protocol: a camera attached to the Apparatus sends a video stream to the FREE server that, when asked, forwards it to the user's browser. This allows the use of a pre-existing video streaming server (such as Janus [26]) and relieves the installation of video visualization software on the user's computer.

IV. VALIDATION

This section describes the functionalities and experiments that are now deployed and being used in a FREE installation.

a) b)

Figure 6 - User Authentication a) login page, c) external users.

A. Ported experiments

Currently, 6 different Protocols are ported to the FREE infrastructure. Two of these Protocols share the same Apparatus (as illustrated by Apparatus A in Figure 2). All the apparatuses were previously available through a different RCL infrastructure and provide experiments in physics. **World Pendulum (mechanics)** is an experiment devoted to studying the local gravity dependence with latitude but used for other physics studies requiring such experiment. The **Inclined plane (mechanics)** is used as the typical experiment for gravity determination with a small cart but equipped with a flap to increase the kinetic friction to model friction by numerical methods. The **Photovoltaic panel (Energy)** uses a dimmed tricolored LED panel to produce electrical energy in a small solar panel. The user can do several studies according to the angle of incidence, irradiated power, and wavelength, including the efficiency according to the impedance matching to the source. The **Langmuir Probe (Plasma Physics)**, an advanced experiment, allows for the characterization of plasma produced by RF. The user collects the I-V curve of a Langmuir probe from where we can extrapolate the electronic temperature and plasma density. The **Cavity (Plasma Physics)** is another advanced experiment used for studying the electromagnetic propagation in a resonant cavity and observing how the existence of a plasma shifts the resonant frequency by altering the speed of light as soon as a RF plasma is generated.

Currently, there are Pendulum apparatus connected to various FREE installations in Europe, Oceania, Africa, and Latin America.

The migration of Apparatuses and protocols to the FREE infrastructure required a new implementation of the Experiment Control to use the available endpoints and data generated in the UI. This development was accomplished in a short amount of time and was done by a MSc Student with intermediate programming knowledge. The effort to create the UI can be quantified by the number of lines of code necessary to define the whole UI. For an experiment whose configuration has 2 numeric values, and the results are presented in one table and 3 plots the programming effort is as follows: 20 HTML lines for the input of 2 values, 25 HTML lines for one table and 3 plots, and 180 lines of JavaScript for the update of the results. The effort to create the UI (HTM and JavaScript) for a new experiment (after the implementation of the corresponding Experiment Control) and the structure of the Execution configuration defined is, on average, lower than 5 hours of continuous work.

a) b)

Figure 5 - FREE a) main menu, b) available apparatuses

B. Remote Services

The FREE allows user authentication using external services such as Google, Microsoft or even University services, besides locally created users. Currently, the running installations integrate these external services differently. Figure 5.a) shows the login page, where the user can either input the FREE username and password (for administrators, for instance) or select an external authentication service. In this FREE installation, three external services are configured that automatically appear on this page. After selecting one of these providers the user is redirected to the corresponding login page, and after successful authentication, the user can access FREE as any other user. Figure 5.b) show the users that were authenticated using Google and the University services.

Before professors can provide access to FREE experiments in their courses, the LMS administrator needs to register for the FREE installation. The administrator only needs to insert the network address of the FREE installation (Tool URL), the Consumer Key and Shared Secret. This information is the responsibility of the FREE administrator to provide. After this configuration, professors can create activities in their courses that will redirect students to FREE. During the course, the student clicks on the provided and is redirected to FREE. Although only evaluated with Moodle, the use of LTI allows the integration of FREE into most LMS following similar steps. If using these authentication mechanisms, any FREE installation becomes public and with universal access. To guarantee fair use of the resources, experiment usage policies and mechanisms to delete old and inactive users were implemented for FREE. This way users will not be able to abuse the systems, and the number of database resources will be limited in order not to degrade other users' experiences.

C. Functionalities

After a user enters FREE a home page with a simple menu is presented (Figure 6.a) allowing access to installed Apparatus and Protocols, Configure execution and results of past executions. FREE is multilingual with translations to English, Portuguese, and Spanish. The list of the installed apparatus (Figure 6.b), presents basic information about each apparatus, the available protocols and its state. From this page, users can create a new experiment by pressing the Run button.

The experiment configuration page presents three tabs, one with the description of the experiment, another with the configuration form and a final one with the results of the execution. A small window with the video stream from the experiment apparatus allows the user to see in real-time the execution of the experiment. One such example is illustrated in Figure 7.a). This corresponds to the configuration of the Pendulum Experiment, where the user must define the initial pendulum displacement and the number of samples to be measured. The three buttons allow the user to save the

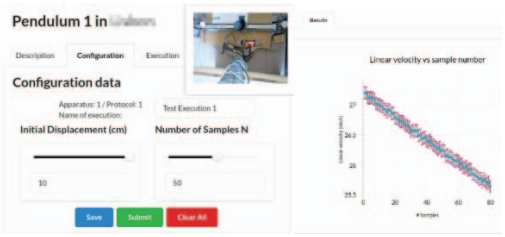


Figure 7 - Experiment window a) configuration b) results

configuration reset it or start the execution. After being saved, an experiment configuration can later be accessed and modified. Only when the Experiment configuration is submitted it may be executed by the apparatus. During the execution of the experiment the user can see the video in real-time, but also see the plots (Figure 7.b)). The table with all the relevant experiment measurements (not shown) can be downloaded in various formats (excel, or CSV).

The experiment programmer only had to define the two input fields and sliders. All the logic related to the buttons, configuration save, and the start of the experiment is generic and handled by the FREE server. Although the FREE user interface is minimal in the number of pages (home pages, list of apparatuses, list of user's experiments and results, and Execution page) the fundamental functionalities available on currently existing RCL systems are already implemented in this first version, fulfilling the basic functional requirements R1 to R6.

V. CONCLUSION

FREE is a new RCL system that uses modern programming languages, techniques and software architectures, and allows the simple development of remote-controlled laboratories. FREE provides a portal to experiments that can be scattered in various institutions of networks and allows their integration and access through external authentication services and existing LMSs. The architecture, the explicit separation of components and the way they interact guarantee that the development or adaptation of new experiments into FREE is done in a fast and efficient way. The programming skills necessary to do these developments are also low. Only basic proficiency in python and web programming is enough.

FREE allows the development and integration of remote experiments developed in a programming language different from python because the remote interactions are well defined and based on REST web services. This explicit separation also allows the development of virtual experiments whose access can be mediated by FREE. In this case, the Experiment Controller of the virtual experiment would simulate the physical process and be integrated with FREE as any remote experiment.

FREE is being developed by a heterogenous small programming team ranging from Electrical and Physics engineering students to one already graduated Informatics Engineers. In the future, this interdisciplinarity can be further leveraged in the development of new functionalities (such as Apparatus reservation or execution priorities), or new types of interactions, that require knowledge and expertise in algorithms, computer engineering and Informatics. The development of new experiments can be done in the future in the context of MScs in specific study fields (Physics, EEC, Biology, Chemistry, or others). Another future possibility lies in the creation of a federation of RCL, where one installation of FREE in a certain institution, will provide seamless and transparent access to experiments in remote FREE installations. This approach will foster communication and collaboration in the development and deployment of experiments, but also increase the availability of resources (number and diversity of experiments) to users.

From the implementation efforts and attained results, we think that FREE successfully handles the limitations identified in current systems, but also provides a starting platform for the evolution, dissemination and increase of users of remote-controlled laboratories.

REFERENCES

[1] J. G Zubía, and G. R. Alves, eds. Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation. Universidad de Deusto, 2012.

[2] Labsland. "Labsland". https://labsland.com/. Accessed July 20, 2022.

[3] Universidade de Santa Catarina. "Laboratórios | RELLE - Ambiente de Aprendizagem Com Experimentos Remotos". http://relle.ufsc.br/labs . Accessed July 20, 2022.

[4] elaboratory Project. "iSES - Internet School Experimental System: Crossroad.". http://www.ises.info . Accessed July 20, 2022.

[5] Instituto Superior Técnico. "elab | Remote Laboratories." elab| Remote laboratories. http://www.elab.ist.utl.pt . Accessed July 20, 2022.

[6] Universidad Nacional de Educación a Distancia. "University Network of Interactive Laboratories.". https://unilabs.dia.uned.es/ . Accessed July 20, 2022.

[7] S. Rapuano, and F. Zoino. "A learning management system including laboratory experiments on measurement instrumentation." IEEE Transactions on instrumentation and measurement 55, no. 5 (2006).

[8] Universidade Federal de Santa Catarina. "relle Docs – Documentação". http://docs.relle.ufsc.br . Accessed July 20, 2022.

[9] University of Deusto. ¨WebLab-Deusto 5.0 documentation¨. http://weblabdeusto.readthedocs.io .Accessed July 20, 2022.

[10] F. Schauer, eal. "REMLABNET-open remote laboratory management system for e-experiments." In 2014 11th Intl Conf. on Remote Engineering and Virtual Instrumentation. IEEE, 2014.

[11] K. E. Kharki, K. Berrada, and D. Burgos. "Design and implementation of a virtual laboratory for physics subjects in Moroccan universities." Sustainability 13, no. 7 (2021).

[12] Z. Laouina, et al. "Manufacturing and Developing Remote Labs in Physics for Practical Experiments in the University." In Intl. Conf. on Remote Engineering and Virtual Instrumentation. Cham, 2020.

[13] F. Limpraptono, A. Ratna, and H. Sudibyo. "New architecture of remote laboratories multiuser based on embedded web server." Intl. Journal of online Engineering 9, no. 6 (2013): 4-11.

[14] C. Lavayssière, B. Larroque, and F. Luthon. "Laborem Box: A scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics." HardwareX 11 (2022): e00301.

[15] S. Vinoski. "CORBA: Integrating diverse applications within distributed heterogeneous environments." IEEE Communications magazine 35, no. 2 (1997): 46-55.

[16] Pallets. "Welcome to Flask". https://flask.palletsprojects.com/ . Accessed July 20, 2022.

[17] SQLAlchemy authors. " SQLAlchemy - The Database Toolkit for Python". https://www.sqlalchemy.org/ . Accessed July 20, 2022.

[18] L. Torre, T. Andrade, P. Sousa, J. Sánchez, and M. T. Restivo. "Assisted Creation and Deployment of Javascript Remote Experiments." Intl. Journal of online Engineering 12, no. 9 (2016).

[19] F. Schauer, et al. "REMLABNET IV-LTI federated remote laboratory management system with embedded multiparameter simulations." International Journal of Online Engineering (2017).

[20] 1EdTech Consortium. " Learning Tools Interoperability | IMS Global Learning Consortium". https://www.imsglobal.org/activity/learning-tools-interoperability . Accessed July 20, 2022.

[21] P. Orduña, et al. "An extensible architecture for the integration of remote and virtual laboratories in public learning tools." IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje 10, no. 4 (2015.

[22] A. Parecki. " OAuth". https://oauth.net/ . Accessed July 20, 2022.

[23] Python Social Auth - Django authors and contributors. "Python Social Auth - Djang ". https://github.com/python-social-auth/social-app-django . Accessed July 20, 2022.

[24] Django LTI Provider authors and contributors. "Django LTI Provider". github.com/ccnmtl/django-lti-provider . Accessed July 20, 2022.

[25] Google, Mozilla, W3C and IETF. "WebRTC Real-time communication for the web". webrtc.org/ . Accessed July 20, 2022.

[26] Meetecho. "Janus: the general purpose WebRTC server". https://janus.conf.meetecho.com/ . Accessed July 20, 2022.

Social Media and its importance in digital communication, before, during and after the COVID era: Case of Panama

Los Social Media y su importancia en la comunicación digital, antes, durante y después de la era del COVID: Caso Panamá

Jayguer Vásquez Torres[1], Clifton Clunie[1], Luis Joyanes Aguilar[2]

jayguer.vasquez@utp.ac.pa, clifton.clunie@utp.ac.pa, ljoyanes@fidesol.org

[1]Universidad Tecnológica de Panamá; [2]Fundación I+D del Software Libre (Fidesol), Granada (España)

***Abstract*— In the last two years, there has been an abrupt change in the use of the Internet and Social Media. For many, these digital media have become the foundation of our lives and we rely on them without giving too much thought to what makes them work or who makes them possible. Its stability gives us stability, allowing people from almost every continent to move seamlessly between their offline and online lives. And yet, billions of people must also navigate this abrupt change without reliable access to the Internet and digital media. This article presents a sample of the role played by social media in the harshest part of the Covid-19 pandemic, in the very particular case of Panama.**

***Keywords*— Social Media, Social Networks, Covid-19, Panama.**

***Resumen* — En los últimos dos años, ha ocurrido un cambio abrupto en el uso de Internet y Social Media. Para muchos, estos medios digitales se han convertido en la base de nuestras vidas y confiamos en ellos sin pensar demasiado en lo que los hace funcionar o en quién lo hace posible. Su estabilidad nos da estabilidad, permitiendo a las personas de casi todos los continentes moverse sin problemas entre sus vidas fuera de línea y en línea. Y, aun así, miles de millones de personas también deben navegar este cambio abrupto sin un acceso confiable a Internet y medios digitales. Este artículo presenta una muestra de cómo ha sido el papel que han tomado los social media en la parte más cruda de la pandemia del Covid-19, en el caso muy particular de Panamá.**

***Palabras claves* —Social Media, Redes Sociales, Covid-19, Panamá.**

1. INTRODUCCIÓN:

Hay mucha confusión en torno a las redes sociales, muchas personas consideran que los social media (medios sociales) es un sinónimo de redes sociales; básicamente una red social es lo que se crea dentro de un social media. Es por eso que muchas estrategias "social media" no son efectivas, porque son incompletas y se basan únicamente en las redes sociales y no en las personas que están usan ese medio social. La confusión surge del hecho de que en la conversación cotidiana el término social media se traduzca como red social. En pocas palabras, los medios sociales son una plataforma para que las personas, y las comunidades interactúen y socialicen para compartir ideas, noticias e intereses específicos.

A diferencia de los medios tradicionales, donde el contenido lo crean las principales televisoras o emisoras de radio, el contenido de las redes sociales lo crea principalmente la propia comunidad y es su participación la que constituye el medio, es una red social interactiva.

Aunque sus funcionalidades de compartir podrían clasificarlas como redes sociales, su característica especial de permitir que un negocio sea encontrado en dispositivos móviles lo hace una herramienta que requiere una estrategia independiente. Permite indexar o marcar el contenido para que sea encontrado por personas que están buscando dentro de estas redes [1].

Para este estudio encontramos que según un análisis realizado por la consultora Kepios, revela que los usuarios de redes sociales en Panamá aumentaron en 650 mil (+23,2 por ciento) entre 2021 y 2022. La cantidad de usuarios en redes sociales a principios de 2022 era equivalente al 78,2% de la población total, tomando en cuenta que los usuarios en las redes sociales no se representan como individuos únicos. Panamá un país con una población que hasta enero 2022 era de 4.41 millones. Importante mencionar que el 69.1% de la población de Panamá vive en centros urbanos, mientras que el 30.9% vive en zonas rurales.

2. MARCO TEÓRICO:

2.1. Antecedentes:

No hay un consenso sobre la data exacta. No obstante, sí se puede validar que las herramientas sociales, con las características que conocemos hoy en día, empezaron a crearse a mediados y finales de los años 90. Sin embargo, los primeros indicios del concepto de redes sociales se remontan a los años 60 con la ley de los 6 grados se separación.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00047

Desde 1947 cuando la Guerra Fría daba sus primeros pasos, precipita la creación de una red de redes, que empezó cuando EEUU creó la Advanced Research Projects Agency (ARPA) lo que permitiría el intercambio de noticia entre instituciones. En 1971, Ray Tomlinson realizó el primer pedido de un email a través de dos computadores que estaban uno a del otro. Un intercambio utilizando un sistema como conocido como BBS (Bulleting Board System), a través de líneas telefónicas con otros usuarios. Pero no fue hasta 1991 cuando Tim Berners (considerado uno de los padres de Internet), con la creación del Lenguaje html, uno de los fundamentos esenciales para que la travesía por la web se hiciera sencilla y popular. Esto suponía un Internet popular y protección con el World Wide Web (www) [2].

3. COVID-19 Y LA TECNOLOGÍA

A principio del 2020 se presentó el primer caso de Covid-19 en Panamá lo que llevo al desarrollo de nuevas tecnologías en muchas organizaciones públicas y privadas. La atención se centró en el desarrollo de soluciones en el campo de la salud que permitan una respuesta rápida a las crisis, como ventiladores, dispositivos de medición de temperatura, movimiento de pacientes, dispositivos para evitar el contacto con superficies y vacunas.

Hoy, las universidades trabajan con la industria también los sectores corporativos trabajan juntos para romper barreras invisibles, y muchas empresas cambian sus modelos de negocios y reenfocan sus líneas de producción en los productos que necesitan y priorizan. El movimiento de innovación colaborativa está floreciendo para dar ese servicio a la sociedad. Muchos de ellos han optado por una estrategia de no proteger la propiedad de la invención, dejando espacio al uso público de la invención como contribución [3].

3.1. Sistemas de información voluntaria de contagios (COVAPPS)

Esta categoría incluye aplicaciones móviles que se originaron en grupos cívicos casi instantáneamente, con el objetivo de crear mapas y estadísticas únicos sobre la epidemia de Covid-19 a partir de datos proporcionados por los usuarios. En un entorno muy abierto y transparente, se requiere una cooperación desinteresada para descargar estas aplicaciones y cargar datos de ubicación y datos sobre posibles infecciones. Esto les permitió crear mapas y tableros que contienen información que, en teoría es en tiempo real, y no es filtrada por las autoridades [4].

4. FAKE NEWS ¿QUÉ ES? CÓMO SE IDENTIFICA

4.1. ¿Qué es?

El término "Fake News" o "noticias falsas" se utiliza para conceptualizar la propagación de noticias falsas que crean un peligroso círculo de desinformación. Las redes sociales permiten a los usuarios ser productores y consumidores de contenido al mismo tiempo, promoviendo la difusión de contenido engañoso, falso o falsificado. Esto crea un círculo vicioso, con informes falsos que se replican miles de veces en segundos [5].

4.2. ¿Cómo se identifican las Fake News?

Quizás se esté preguntando cómo encontrar noticias falsas en Facebook y otros sitios de redes sociales. ¿Cómo pueden los estudiantes evitar las noticias falsas? ¿O cómo puedo evitar compartir accidentalmente información incorrecta en línea? Aquí hay algunos consejos para ayudarlo a encontrar la información incorrecta, encontrar sitios de noticias falsas y pensar antes de compartir.

4.2.1. Comprueba la fuente

Comprueba la dirección web de la página a la que accedes. Los sitios de noticias falsas pueden tener direcciones URL mal escritas o usar extensiones de dominio.

4.2.2. Comprueba tus propios sesgos

Mientras más leamos desde fuentes y perspectivas diversas, más probable es que podamos obtener conclusiones acertadas.

4.2.3. Comprueba si es una broma

Los sitios web de sátira son populares y, a veces, no es claro si una historia es solo una broma o una parodia.

4.2.4. Comprueba si las imágenes son auténticas

Las imágenes que ves en las redes sociales podrían estar editadas o manipuladas. Puedes usar herramientas como la búsqueda inversa de imágenes de Google para verificar de dónde viene una imagen y si es que fue alterada [6].

5. BENEFICIOS DURANTE LA PANDEMIA

5.1.1. Aceleración de uso de tecnologías en las empresas

Debido las medidas de protección tomadas de quedarnos en casa, muchas empresas se vieron afectadas, al no tener un público capaz de comprar presencialmente, muchas de estas empresas decidieron digitalizarse brindar sus servicios y productos online, siendo esta una forma ya existente, pero fue prácticamente obligatoria, dando un último empujón para utilizar estas herramientas tecnológicas, que nos resuelven y benefician a todos. Siendo de este modo, todo tipo de negocio siendo restaurantes, supermercados, plataformas de pago, etc., nos brindaron nueves formas para obtener un producto o un servicio necesario o para entretenimiento.

5.1.2. Utilizar plataformas para comunicarnos

Muchas de las redes sociales, buscaron maneras de innovar o adaptar sus plataformas para facilitar es uso de las video llamadas y el chat combinado, distintas plataformas implementaron el poder ver películas y comunicarse a la vez, del mismo modo se mantuvieron las aplicaciones que facilitaban la comunicación para seguir asistiendo a las clases de escuela y universidad, para reuniones de trabajo, o reuniones familiares, cumpleaños, fechas importantes, etc. Este tipo de innovaciones, nos han brindado, mucha facilidad a la hora de mantenernos comunicados.

5.1.3. Las medidas tomadas por el gobierno, basado en la proyección de las estadísticas de aumento de casos, vacunación

Ya tenemos la facilidad y lo vemos como algo regular el mantenernos al día en cuanto a noticias, pero tomando en cuenta situaciones como la del Covid-19 con la cantidad de información que había los picos de tráfico que ello conllevo, se logró seguir haciéndolo como normalmente se hacía debido a la efectividad, mejora ,actualización de las infraestructuras que nos permiten mantenernos conectados, tener esta facilidad para mantenernos informados con respecto a estado delo casos, actualizaciones sobre la vacuna, entre otras distintas metodologías para llevar a cabo las vacunaciones.

5.1.4. Trabajo desde casa

El teletrabajo ha permitido a muchas personas trabajar desde casa, por precaución incluso antes de que se declarara el estado de alarma. Esta tecnología proporciona a las empresas un completo conjunto de herramientas que les permite organizar y compartir el trabajo sin depender de medios físicos de trabajo (como servicios en la nube), así como videoconferencias o acceso remoto a funciones similares disponibles en nuestras estaciones de trabajo. Si bien las empresas con alguna forma de trabajo remoto podrán sacar conclusiones sobre lo que este enfoque ha hecho por ellas, de alguna manera está siendo probado (aunque absolutamente necesario), en términos de ahorro de costos, reducción de ausencias, etc.…, pueden tener una clara ventaja, es decir, pueden continuar con su actividad (en mayor o menor grado).

6. LAS COMPARACIONES DE LA SOCIAL MEDIA (ANTES, DURANTE Y DESPUES) EN PANAMÁ

6.1. Audiencia en la social media

Para el 2020, en Panamá la conexión de usuarios en la social media era de 2,40 millones de usuarios, lo que para ese año el número de usuarios en la social media aumentó a 199 mil (+9,0%) entre abril de 2019 y enero de 2020 [9][10].

En comparación a enero 2021, Panamá alcanza una población de 4,35 millones de habitantes, por lo que, el 50,0% de la población es femenina, mientras que el 50,0% de su población es masculina. El 68,6% de la población de vive en centros urbanos, mientras que el 31,4% vive en zonas rurales. Por lo que el número de usuarios de redes sociales en Panamá equivale al 64,4% de la población total en enero de 2021.
Estos datos demuestran que la mayor conexión proviene de los centros urbanos por la fácil conectividad. Mientas que para las zonas rurales para zonas de difícil acceso se dificulta las conexiones a internet, obstaculizando de cierta manera el acceso a los usuarios a navegar en la social media [11].

Mientras tanto, a principios del 2022, la cantidad de usuarios en la social media en Panamá era parecido al 78,2 por ciento de la población total, pero es importante tener en cuenta que es posible que los usuarios de redes sociales no se representen un solo individuo, si no que puede ser un usuario con varias cuentas activas [12].

En referencia a la Figura 1. Podemos identificar que, desde el 2019 hasta enero de 2022, la audiencia ha aumentado favorablemente, en consecuencia, de la covid-19, el encierro permitiendo a los usuarios experimentar y comunicarse por medio de la social media, estadísticamente sustentado [12].

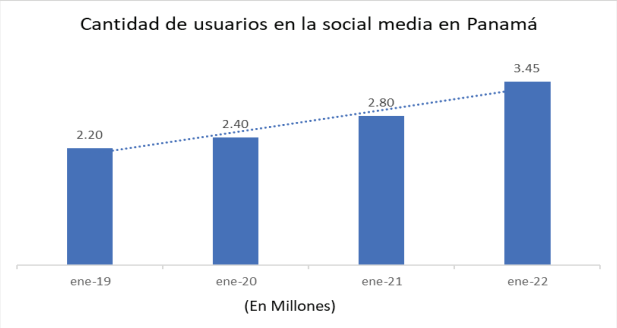


Figura 1. Cantidad de usuarios conectados desde enero del 2019 hasta enero 2022 en la social media [12]

6.1.1. Facebook

Durante el análisis realizado del 2019 al 2022 en el uso de Facebook se demuestra una gran diferencia en el uso y la cantidad de usuario activos en esta red social. Pasemos a evaluar la data esencial suministrada por Data Reportal, como dato inicial Panamá cuenta con una población total de 4.19 millones de habitantes de los cuales el 68% son residentes en zonas urbanizadas, el siguiente dato proporcionado sería el de la cantidad de líneas telefónicas activas el cual tiene un total de 5.27 millones y si comparamos con la población total tenemos un 126% es decir que existen más teléfonos celulares que habitantes.

Comprendiendo esto analicemos los datos de Facebook durante el 2019, la cantidad de usuario activos es de 1.90 millones de los cuales tenemos una división igualitaria siendo de 50% para hombre y mujeres. En esta cantidad de usuarios mencionados se pudo observar que no existieron variaciones en la audiencia analizada trimestralmente.

Ahora bien, para el 2020 año en que se presenta el primer caso de COVID-19 en la República de Panamá, se pueden observar algunos cambios. En cuento a la población tuvo un aumento teniendo como población total de 4.19 millones de los cuales 68% habita en áreas urbanizadas un porcentaje igual al del 2019 y ahora tenemos que la cantidad de usuarios con líneas activas disminuyo a 4.86 millones con un porcentaje de 114% en comparación con la cantidad de habitantes. Sabiendo esto vemos analicemos los datos demostrados por Facebook, con un 1.8. Millones de usuarios activos, lo que comparado con el total de población (mayores de 13 años) representa un 55% de la población los cuales se dividen en 50.6% son hombres y un 49.4% mujeres.

En el 2021 la población tuvo un incremento de 1.6% lo que se traduce a 67 mil ciudadanos más con un total de 4.35 millones. En cuanto a los usuarios con conexión móvil se demostró un descenso de un 2.5% lo que es 120 mil líneas menos a las del 2020 es decir 4.69 millones. En cuanto a Facebook se incrementó la audiencia a 2 millones de usuarios, comparado con los habitantes mayores de 13 años resulta un 59.7%, en la que tenemos un 50.3% hombres y 49.7 de público femenino.

Lo datos del 2022 año actual nos indicada que la población de Panamá tiene un total de 4.41 millones con un 69.1% en urbanización, mientras tanto un 5.27 millones de habitantes con uso de teléfonos activos es decir 119%. Para Facebook vemos que el total de usuarios es de 1.95 millones de usuarios en donde 57.1% son mayores de 13 años, con un 49.8% de hombres y 50.2% son mujeres.

Como hemos podido observar en las cantidades de usuarios demostrados para Facebook existen diferencia en el antes, durante y después de la pandemia. Observemos las gráficas para mejor comprensión del comportamiento.

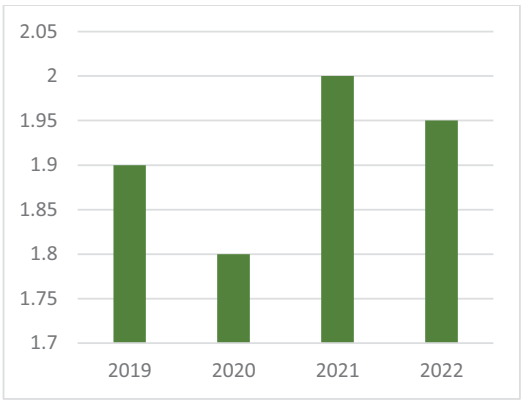


Figura 2. Usuarios de Facebook

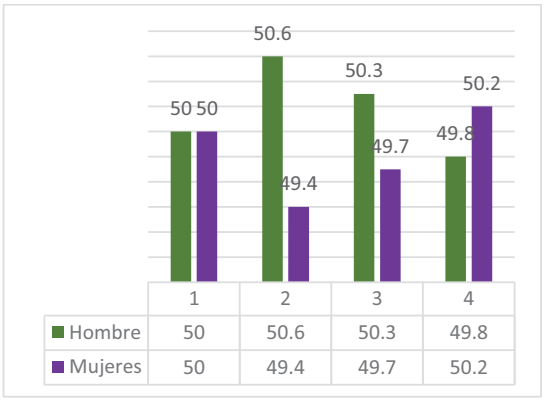


Figura 3. Comparativa de Hombres y mujeres

6.1.2. Instagram

En el caso de Instagram de igual forma se observan comportamientos analizados por la data obtenida en Data Reportal, vemos que para el 2019 la cantidad de usuarios activos en Panamá es de 1.50 millones lo que representa a un 46% de la población mayores de 13 año, en donde el 52% de los usuarios son hombres y un 48% mujeres.

Por otra parte, tenemos la data obtenida para el año siguiente 2020 en donde tenemos una cantidad de usuario activos de 1.60 millones lo que representa un 49% de la población mayor a 13 años, siendo así una división de 51.9% son hombres y un 48.1% mujeres. En comparación del 2019 se ve un incremento en la cantidad de usuario activos y variaciones entre hombres y mujeres.

Es importante resaltar que para este año en Panamá se da inicio de la Pandemia COVID-19, lo que da mucho sentido a este incremento.

Continuemos con el 2021. En este año se contó con 2.00 millones de usuarios activos para Instagram siendo así un 59.7% de la población total mayor a 13 años, esta cantidad incremento a relación del último corte donde se mostró un 5.3% lo que se traduce a un total de 100 mil usuarios nuevos a diferencia del año anterior, dividiéndolo de este modo con un 51.0% para los hombres y 49.0% para las mujeres.

Para el presente año 2022 Instagram ha reportado una cantidad de usuarios de 2.40 millones, esto significa un 54.4% de la población total mayores de 13 años, y para este año tenemos que tanto hombres como mujeres representa de manera igualitaria el 50% por cada uno.

Hasta el momento Instagram entre la social media analizadas es la más utilizada en Panamá lo cual ha incrementado a lo largo de la Pandemia.

Observemos la gráfica, para mejor comprensión del comportamiento en el antes, durante y después del covid-19.

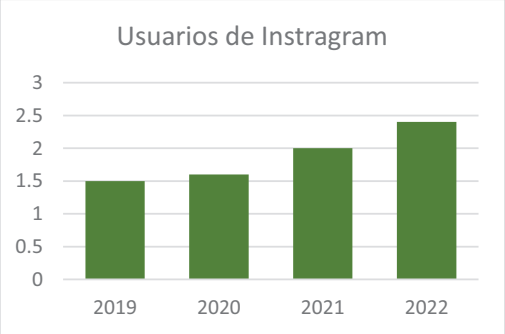


Figura 4. Usuarios de Instagram

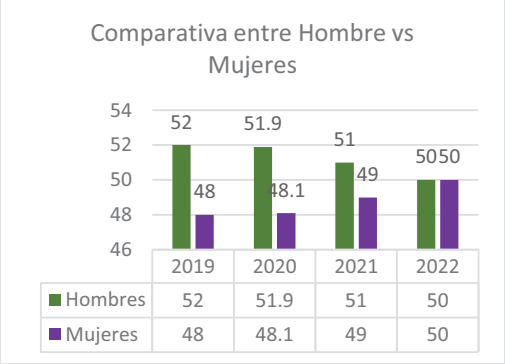


Figura 5. Comparativa de Hombres y mujeres

6.1.3. Twitter

Basado en la información de Data Reportal del 2019, podemos ver que la plataforma tuvo una audiencia de 322.5 mil usuarios que fueron alcanzadas por la implementación de anuncios dentro de la plataforma, apenas el 9.9% de los adultos mayores a los 13 años fueron alcanzados dentro de la misma red social. Para la evaluación del último cuatrimestre era del 0%.

Dentro del estudio por parte de la página Data Reportal podemos especificar cuáles son los porcentajes de audiencia entre hombre y mujer. Estos serían 30% para audiencia masculina y del 70% para audiencia femenina. Esto quiere decir que para este año 2019 más mujeres usaban la red social.

Para el año 2020 los datos que vemos dentro de la audiencia aumentaron significativamente. La audiencia que alcanzo para ese año fue de 469.0 mil usuarios y la comparación entre la población total mayor de 13 años fue del 14% esto quiere decir en un año pudo aumentar en 4.1% la cantidad de usuarios mayores a los 13 años. Para este año aumento en 3.3% en el último cuatrimestre de evaluación.

Se puede comparar que la audiencia entre la cantidad de hombres y mujeres que usan la red social para este año un pequeño cambio para el sexo masculino aumento en 38.8% y para el sexo femenino disminuyo al 61.5%. Esto quiere decir que la mayoría de las publicidades fueron dirigidas a lado masculino.

La audiencia potencial a la cual se puede alcanzar mediante la implementación de los anuncios es de 406.4 mil usuarios de la plataforma para el año 2021, lo que, comparado con el total de la población mayores a 13 años, representa un 12.1%.

Esta cifra ha tenido un incremento en el último cuatrimestre de un 7.5% lo que significa más de 28 mil usuarios nuevos a la plataforma. El porcentaje de la audiencia femenina es un 33.3%, mientras que la masculina es un 66.7%. Bastante amplia la diferencia de público, factor clave al momento de planear una estrategia.

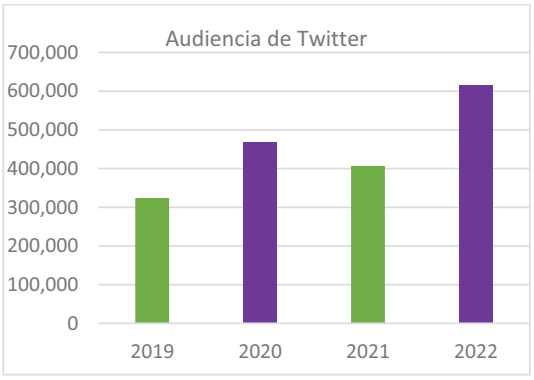


Figura 6. Audiencia de Twitter

En el año 2022 hasta el mes de abril que se hizo la evaluación de la audiencia potencial en la que se puede alcanzar en la implementación de anuncios es de 616.3 mil de usuarios, lo que quiere decir que hubo un aumento considerado de 18% en alcance que tuvo dentro de la

plataforma para usuarios mayores de 13. Además, dentro de la población total tuvo un aumento del 13.9% del alcance publicitario de la plataforma.

Lo más relevante es que el cambio entre los últimos años en el último cuatrimestre del 2022 es de 24.5% de usuarios, más 121 mil usuarios dentro de la plataforma. El porcentaje de los usuarios que usan a través de una página web o desde la computadora es del 20.7% [7] [8].

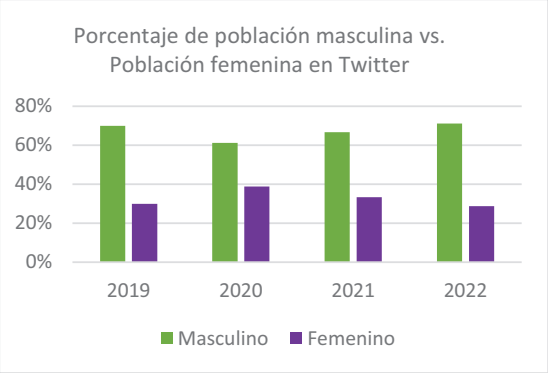


Figura 7. Comparación de población

6.1.4. LinkedIn

En el caso de LinkedIn en el año 2019 podemos notar que hubo una audiencia de 640.0 miles de personas registradas como miembros de la plataforma y se dividió en la población femenina en un 47%, al contrario de la población masculina en 53%.

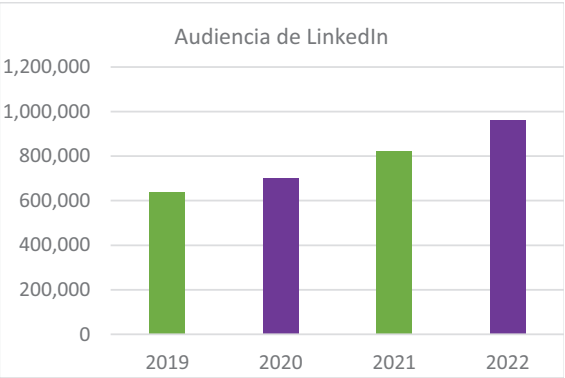


Figura 9. Audiencia de LinkedIn

En el año 2020 hubo cambios significativamente grandes, esto quiere indicar que por la página Data Reportal la audiencia de miembros de la plataforma Linkedin fue de 700.0 mil personas, dentro de la población los mayores de 18 años son el 24%, este año tuvo un aumento en evaluación del último cuatrimestre de 1.4% en el alcance de la plataforma.

Siendo así la división entre población masculina fue de 57.1% y la población femenina de 42.9%. Esto quiere indicar que hubo un incremento potencia en la población masculina en el año 2020.

Para cada vez que vamos avanzando veremos cambios en la audiencia del año 2021 aumento en 820.0 mil de usuarios alcanzados por la plataforma LinkedIn, para este momento del estudio verificamos que la población mayor de los 18 años fue de un 27.5%. Esto quiere decir que como para este año ya estábamos dentro del foco más fuerte de la pandemia podemos observar que todos los trabajos fueron cambiando a teletrabajo (los que sí podrían aplicar). Y las empresas comenzaron a enfocarse en buscar nuevos trabajadores por sus hojas de vida virtuales.

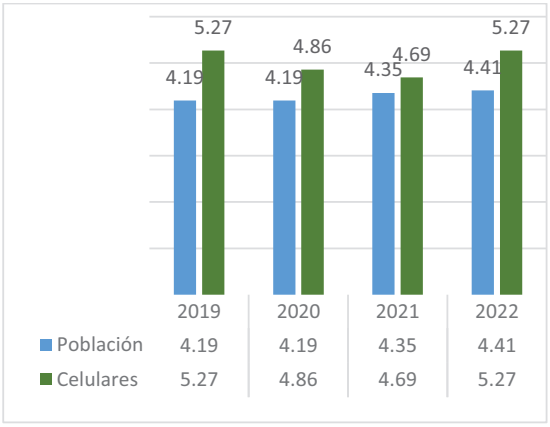


Figura 9. Comparación de población

En la evaluación del último cuatrimestre podemos ver que tuvo un aumento de 3.8% más 30 mil usuarios alcanzados por la plataforma. A partir de aquí vemos que la división entre la población masculina tuvo una caída hasta el 46.5% y se ve el aumento en la población femenina de 53.5%.

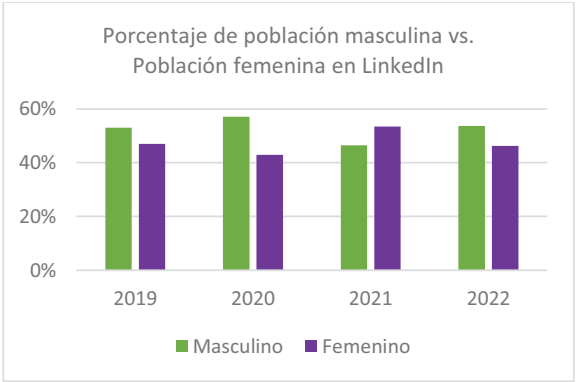


Figura 10. Comparativa de Hombres y mujeres

Este año 2022 viene con cambios completamente diferentes a los que podemos observar de los anteriores, ya que se tiene evaluado que la audiencia de LinkedIn fue de 960.0 mil de usuarios alcanzados por la plataforma siendo así el 31.4% de usuarios mayores a los

18 años además la dentro de la cantidad de audiencia podemos ver que el 53.7% es población masculina, quiere decir que hubo aumento comparado el año anterior y la población femenina hubo un decremento de 46.3%.

Los cambios en la sociedad fueron grandes a partir del uso de nuevas tecnologías, el alcance de la plataforma contra la población total fue de un 21.7%. En la revisión del último cuatrimestre del 2022 se pudo notar un aumento del 2.1% y más de 20 mil usuarios alcanzados por la plataforma.

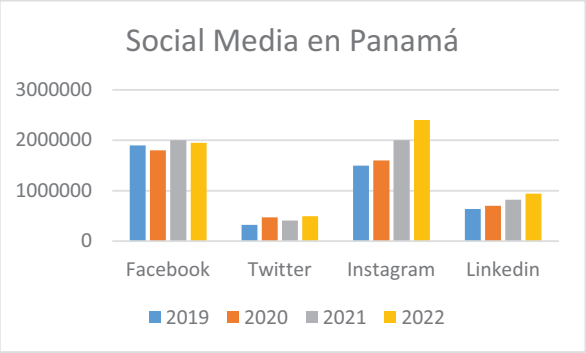


Figura 10. Comparación de Usuarios en los Social Media por años

Tabla 1. Comparación de Usuarios en los Social Media por años

Social Media	2019	2020	2021	2022
Facebook	**1.9 millones**	**1.8 millones**	**2 millones**	**1.95 millones**
Twitter	**322.5 mil**	**469 mil**	**406.4 mil**	**495.1 mil**
Instagram	**1.5 millones**	**1.6 millones**	**2 millones**	**2.4 millones**
Linkedin	**640.0 mil**	**700 mil**	**820 mil**	**940 mil**

Fuente de: Data Report [9] [10] [11] [12]

7. CONCLUSIONES

Las redes sociales fueron uno de los medios de comunicación digital más utilizado durante la crisis de pandemia de Covid-19, un testigo importante de cómo el coronavirus provocó cambios profundos en el funcionamiento de la sociedad y el comportamiento humano. Al igual que los medios de comunicación tradicionales, vimos como los Social Media pueden llegar a tener el efecto de cambiar la dinámica de las personas, tanto para mejorar su estilo de vida a través de la inteligencia colectiva, como de afectar el estado de animo a través de los Fake News (Noticias Falsas). Esta ultima una de las principales desventajas que se pueden destacar, debido a la gran cantidad de información a la que se tiene acceso, lo que puede llegar a provocar mayores riesgos de ansiedad y depresión, pérdida de privacidad, etc. Sin embargo, también hay aspectos positivos, como nuestra capacidad de refrescar nuestra mente a través de actividades o desafíos proporcionados en las redes sociales, y conectarnos con amigos y seres queridos de nuestro entorno.

Las redes sociales digitales deben funcionar como un espacio equilibrado de información y entretenimiento, sin causar más daño físico, social o mental. En definitiva es recomendable que los usuarios Social Media actuemos con responsabilidad al crear o compartir contenido, curando la información y verificando las fuentes antes de difundir Fake News, que en muchos casos puede afectar a terceras y cuartas personas. Por otro lado, las redes sociales también desempeñaron un papel importante al colaborar en la creación de mapas digitales que ayudaron a los países a seguir el progreso de la pandemia, registrando contagios, defunciones y vacunación en tiempo real.

REFERENCIAS

[1] D. GÓMEZ, «Social Media no traduce Redes Sociales,» Bienpensado, 8 Noviembre 2012. [En línea]. Available: https://bienpensado.com/que-es-social-media-y-su-diferencia-con-las-redes-sociales/. [Último acceso: 25 Abril 2022].

[2] Indios Media, «La historia de las redes sociales que no conocías,» [En línea]. Available: https://www.indosmedia.com/historia-redes-sociales/. [Último acceso: 26 Mayo 2022].

[3] H. Casanova, «COVID-19, una oportunidad para la innovación tecnológica,» Banco de Desarrollo de America Latina, 24 Mayo 2020. [En línea]. Available: https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2020/05/covid19-una-oportunidad-para-la-innovacion-tecnologica/#:~:text=El%20enfoque%20ha%20sido%20la,superficies%2C%20vacunas%2C%20entre%20otros.. [Último acceso: 26 Mayo 2022].

[4] AEPD, Agencia Española Protecion Datos, «EL USO DE LAS TECNOLOGÍAS EN LA LUCHA,» Mayo 2020. [En línea]. Available: https://www.aepd.es/sites/default/files/2020-05/analisis-tecnologias-COVID19.pdf. [Último acceso: 26 Mayo 2022].

[5] FIP, Federacion Internacional de Periodistas, «¿QUÉ SON LAS FAKE NEWS? GUÍA PARA COMBATIR LA DESINFORMACIÓN,» [En línea]. Available: https://www.ifj.org/fileadmin/user_upload/Fake_News_-_FIP_AmLat.pdf. [Último acceso: 26 Mayo 2022].

[6] Kaspersky, «Como identificar Noticias,» [En línea]. Available: https://latam.kaspersky.com/resource-center/preemptive-safety/how-to-identify-fake-news. [Último acceso: 26 Mayo 2022].

[7] Y. M. Shum, «Situación digital, Internet y redes sociales Panamá 2020,» Yi Min Shun Xie, 25 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://yiminshum.com/social-media-panama-2020/#:~:text=La%20cifra%20de%20los%20usuarios,que%20ahora%20usan%20redes%20sociales. [Último acceso: 29 Mayo 2022].

[8] Y. M. Shum, «Situación digital, Internet y redes sociales Panamá 2021,» Yi Min Shum Xie, 21 Febrero 2021. [En línea]. Available: https://yiminshum.com/redes-sociales-panama-2021/#:~:text=Factores%20financieros-,Crecimiento%20anual%20digital,menos%20que%20el%20a%C3%B1o%20pasado... [Último acceso: 29 Mayo 2022].

[9] S. Kemp, «Data Reportal,» 31 Enero 2019. [En línea]. Available: https://datareportal.com/reports/digital-2019-panama. [Último acceso: 27 Mayo 2022].

[10] S. Kemp, «Data 2020: Panama,» Data Reportal, 18 Febrero 2020. [En línea]. Available: https://datareportal.com/reports/digital-2020-panama. [Último acceso: 27 Mayo 2022].

[11] S. Kemp, «Digital 2021: Panama,» Data Reportal, 12 Febrero 2021. [En línea]. Available: https://datareportal.com/reports/digital-2021-panama. [Último acceso: 26 Mayo 2022].

[12] S. Kemp, «Digital 2022: Panama,» Data Reportal, 16 Febrero 2022. [En línea]. Available: https://datareportal.com/reports/digital-2022-panama. [Último acceso: 27 Mayo 2022].

Availability and Use of ICTs in Rural Areas in Panamá: Tulú Case Study

Disponibilidad y Uso de las TIC en Zonas Rurales en Panamá: Caso de Estudio Tulú

[1]Yarisel Núñez-Bernal, [2]Ismael Camargo-Hernríquez, [3]José Isaza-Gonzalez and [4]Juan Castillo
[1, 2]Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Tecnológica de Panamá
[3, 4]Centro Internacional de Desarrollo Tecnológico y Software Libre, Universidad Tecnológica de Panamá
[1]yarisel.nunez@utp.ac.pa, [2]ismael.camargo@utp.ac.pa, [3]jose.isaza@utp.ac.pa, [4]juan.castillo21@utp.ac.pa

Abstract*— The main objective of this study was to understand the current situation regarding the availability, access, and degree of use of ICTs in rural areas. With this, we sought to know the infrastructure, services and associated challenges in these areas and approach solutions in this regard. The Tulú region in the province of Coclé was considered as a case study. Initially, a cartographic study was carried out and information was collected in the field through interviews and discussion groups. This made it possible to determine the impact and contribution that ICTs can have on the lives of people in this area. The results of the study indicate that in the social and economic dimension, the highest level of education and schooling is Premediate (General Basic Education). The main economic activity in the region was also identified as hat making and subsistence agriculture, confirming that more than half of the inhabitants of the Tulú region have an average income of US$80 per month. The technical characterization indicated that there is no Internet access and public meetings are the most effective means of communication. Thus, digital literacy and the strengthening of human development aspects in this area are still a pending task.

***Keywords*— digital divide, rural areas, rural solutions, ICT.**

Resumen* —El objetivo principal de este estudio fue comprender la situación actual sobre la disponibilidad, acceso y grado de utilización de las TICs en zonas rurales. Con esto, se procuró conocer la infraestructura, servicios y retos asociados en estas áreas y aproximar soluciones al respecto. Se consideró como caso de estudio, la región de Tulú en la provincia de Coclé. Se realizó inicialmente, un estudio cartográfico y un levantamiento de información en campo mediante entrevistas y grupos de discusión. Esto permitió determinar el impacto y contribución que pueden tener las TICs en las vidas de las personas de esta zona. Los resultados del estudio indican en la dimensión social y económica, que el nivel de educación y escolaridad más alta es la Premedia (Educación Básica General). También se identificó como principal actividad económica de la región, la fabricación de sombreros y la agricultura de subsistencia, confirmándose que más de la mitad de los habitantes de la región de Tulú tienen un ingreso promedio de 80 dólares mensuales. La caracterización técnica, indicó que el acceso a Internet es nulo y las reuniones públicas son el medio de comunicación más eficaz. Así, la alfabetización digital y el reforzamiento de los aspectos de desarrollo humano en esta zona siguen siendo una tarea pendiente.

Palabras claves — brecha digital, áreas rurales, soluciones rurales, TIC.

I. INTRODUCCÓN

La brecha digital ha representado uno de los principales desafíos a enfrentar en muchos países alrededor del mundo [1]. Reducir los efectos de esta sobre las regiones más apartadas del desarrollo urbano, requiere de inversiones considerables con un retorno de inversión relativamente lento o nulo, desde el punto de vista de los proveedores de servicios. Del mismo modo, la provisión universal de acceso a Internet por parte de los gobiernos en zonas rurales todavía sigue siendo una tarea difícil de realizar [2]. Debido principalmente a las barreras tecnológicas y económicas existentes en estas regiones. En consecuencia, la disponibilidad y adopción de las diferentes modalidades de acceso a Internet (Internet por cable, fibra óptica y banda ancha móvil) se evidencia más en las zonas urbanas y no así en zonas rurales, lo que genera un elemento de inequidad, la desigualdad digital [3]. Adicionalmente, también se deben considerar otros aspectos como el tipo de tecnología, la fiabilidad y velocidad de transmisión [4]. Éstos aspectos, a su vez, imponen nuevos requisitos a las infraestructuras de telecomunicaciones en cuanto a conectividad digital se refiere [5].

Según las estadísticas presentadas por el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) el 32% de la población de América Latina y el Caribe no tiene acceso a Internet. El estudio resalta que la población de las zonas rurales posee un mayor porcentaje de afectación, con cifras alrededor del 77% de los hogares que no cuentan con conexión. En contraste con las zonas urbanas que se reduce al 23% [6]. Adicionalmente, las cifras presentadas por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y Microsoft Corporation [7], señalan que sólo la mitad de los países de la región cuentan con una agenda de digitalización y alrededor del 67% de las escuelas no disponen de una velocidad de conexión suficiente. A ello se suma el hecho de que la información disponible sobre la conectividad en el medio rural es muy escasa y sólo el 50% de los países que la poseen cuenta con mediciones específicas sobre conectividad en el ámbito rural [8].

A pesar de que en Panamá, se han realizado grandes esfuerzos frente a la actual revolución digital, aún queda mucho por hacer para conectar a los que no están conectados. Según los datos presentados por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), sobre el acceso a las Tecnologías de la Información y la Comunicación(TIC) antes de la pandemia por COVID-19, muestran que solo el 58% de la población usó Internet en el año 2017 [9].Por su parte, las cifras presentadas por el BID [10] y DataReportal [11] durante los años 2021 y 2022

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00048

muestran un incremento del 6% y 8.6% respectivamente, en comparación a las cifras presentadas por la SENACYT. Sin embargo, este incremento se ve mayormente reflejado en las zonas urbanas, en donde las infraestructuras de telecomunicaciones están ampliamente disponibles. Mientras que, en las zonas rurales al estar muy lejos de una red de conectividad y al no representar una inversión viable, requerirán otro tipo de soluciones.

En este escenario, las TIC han desempeñado un rol determinante en el desarrollo pleno de diversas actividades en diferentes ámbitos de aplicación, alrededor del mundo [12]. En donde el acceso efectivo a las redes de telecomunicaciones posibilita el funcionamiento de las aplicaciones digitales que habilitan el teletrabajo, la educación a distancia, la realización de trámites, la telemedicina, entre otras [13]. Sin embargo, la digitalización no se está dando por igual en todo el mundo. En este punto es importante resaltar el acceso a Internet y la alfabetización digital, es decir, el proceso de aprendizaje que permite a una persona adquirir competencias para entender y aprovechar el potencial educativo, económico y social de las nuevas tecnologías.

En este contexto, el presente trabajo analiza el problema de la creciente brecha digital en el ámbito educativo para las zonas rurales. Para ello, se define como caso de estudio, el levantamiento de la información de conectividad digital de las escuelas ubicadas en Panamá, específicamente la región norte del Distrito de Penonomé, Provincia de Coclé. Durante la fase inicial se evalúan las posibles opciones que podrían considerarse para abordar de forma sostenida la problemática en cuanto a las limitaciones de cobertura digital en estas regiones. Teniendo en cuenta el alcance a las infraestructuras de telecomunicaciones existentes (ubicación geográfica y nivel socioeconómico), así como también, los programas o iniciativas presentes en la actualidad y las soluciones tecnológicas que pueden implementarse, con miras a favorecer la alfabetización digital, la educación, el desarrollo y la inclusión social de los habitantes de las comunidades en zonas rurales.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: la sección II presenta la cobertura digital en Panamá y las diferentes iniciativas o proyectos de conectividad rural. La sección III contextualiza los resultados obtenidos en la evaluación de la conectividad digital mediante el caso de estudio en Tulú. Por último, la sección IV presenta las conclusiones del trabajo y propone algunas mejoras a futuro.

II. COBERTURA DIGITAL EN PANAMÁ

La distribución de la infraestructura de telecomunicaciones en Panamá se lleva a cabo tomando en cuenta las características sociodemográficas del país y las tecnologías de acuerdo con los operadores y tipos de servicios existentes en la actualidad. En este sentido, según las estadísticas presentadas por el BID [10], Panamá cuenta con una población total de 4,2 millones de habitantes y una superficie de 75,420 Km^2. Se divide en 10 provincias y 5 comarcas, 74 distritos y 631 corregimientos. Aproximadamente el 70% de la población reside en 15 de los 76 distritos. Mientras que el 30% reside en los 61 distritos restantes, lo que representa una alta concentración poblacional. Además, Panamá se caracteriza por tener una topografía compleja, un bajo nivel de desarrollo económico y una diferencia considerable del nivel de ingresos entre los deciles más altos y los más bajos de la población.

En cuanto a los operadores y tipo de servicios, en el contexto de este trabajo nos referiremos a los operadores que proporcionan el servicio de banda ancha móvil LTE (*Long Term Evolution*). Estos proveedores son: Cable & Wireless Panamá, Tigo Panamá, Claro Panamá y Digicel Panamá. En donde tres de los proveedores manejan un porcentaje de cobertura de 95% en las tecnologías 2G, 2.5G, 3G y 3.5G, mientras el otro proveedor tiene un porcentaje de cobertura de 85%. Estas diferencias son más evidentes en la tecnología 4G, como se muestra en la Figura 1, donde Cable and Wireless y Tigo ofrecen la mayor cobertura alcanzando un 75%, respectivamente, seguido por Claro con un 65% y Digicel con 50% [10].

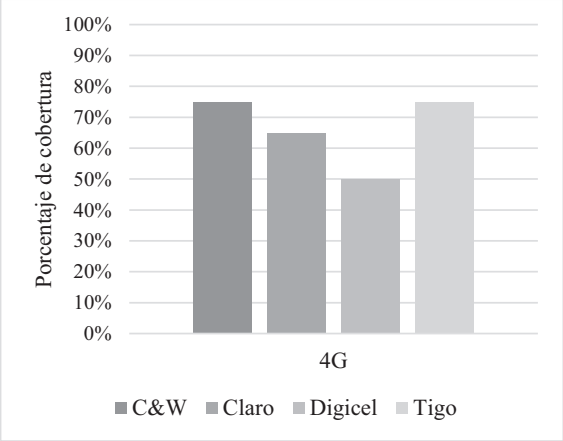


Fig. 1. Porcentaje de cobertura de banda ancha móvil LTE 4G en Panamá.

Al respecto, Panamá contempla desde el punto de vista global, el reto de conectividad en pro de la educación [14]. Esto como parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) aprobados en la Asamblea de las Naciones Unidas [15] y adoptados en la República de Panamá mediante el Decreto Ejecutivo 393 de septiembre de 2015 [16]. En este sentido, se han presentados algunos proyectos e iniciativas con miras a alcanzar estos objetivos, principalmente el que motiva *"(...) a movilizar recursos e implementar soluciones innovadoras y adecuadas al contexto para proporcionar una educación a distancia a la vez que, se aprovechan los enfoques de alta tecnología, baja tecnología o sin tecnología"*. Los mismos se presentan a continuación.

A. Proyectos e iniciativas actuales de conectividad rural

Encaminados con el ODS-4 (Educación) que "*busca asegurar que todos los niños completen su educación primaria y secundaria gratuita para 2030. También aspira a proporcionar acceso igualitario a formación técnica asequible y eliminar las disparidades de género e ingresos, además de lograr el acceso universal a educación superior de calidad*", el Ministerio de Educación de Panamá (MEDUCA), implementó proyectos como:

1) Proyecto de ley 456: Este aún se encuentra en debate en la Asamblea Legislativa Nacional. Busca asegurar la conectividad a Internet y garantizar el acceso a los estudiantes a plataformas digitales, herramientas y contenidos desarrollados, permitiendo el acceso a Internet a las escuelas públicas a nivel nacional [17].

2) Plan educativo Solidario: Este plan ofreció acceso móvil ilimitado y gratuito a las plataformas virtuales del

MEDUCA, en beneficio de estudiantes de escuelas oficiales y personal docente de todo el país, para fortalecer la educación a distancia. Además, permitió hasta 2 Gb de datos para la visualización de videos educativos resultante de los enlaces a dicha plataforma. Esta estrategia estuvo vigente hasta diciembre 2020 [18].

3) Alianza Gobierno de Panamá y Microsoft Corporation: Esta alianza persigue fortalecer las capacidades tecnológicas de estudiantes y docentes del sistema educativo estatal, llevar conectividad a las zonas remotas del país a través de tecnologías innovadoras y acelerar la transformación digital del Estado. Los beneficiarios directos serán los docentes en servicio activo de las distintas regiones escolares del país; destacando la atención de los docentes de las áreas comarcales.

Por su parte la Autoridad de Innovación Gubernamental (AIG) se compromete a través de la Agenda Digital Nacional [19] a desarrollar iniciativas que ayuden a solventar los problemas de conectividad a las redes de telecomunicaciones en las diferentes regiones del país, incluyendo las zonas rurales a través de proyectos como:

4) Programa de Cobertura Digital Nacional: Es una de las estrategias de modernización del estado panameño incluidas en la Agenda Digital Nacional Panamá 4.0, que contempla el desarrollo de la sociedad del conocimiento como medio para reducir la brecha digital. Promueve la creación de proyectos, entre ellos:

a) Red Nacional Internet 2.0: La cual abarca 1,320 puntos de acceso de conexión gratuita de Internet Wifi (fibra óptica, red de microondas o vía satelital) con una velocidad de 2 Mb en 288 corregimientos a nivel nacional [19]. Actualmente se evalúa la actualización de esta red a la versión 3.0, con un ancho de banda superior a su predecesora.

5) Infoplazas-AIP: Tienen la misión de promover y participar en el desarrollo y utilización de las TICs como herramientas para reducir la brecha digital, y democratizar el acceso al conocimiento. Destaca por la creación de 321 Infoplazas ubicadas en 10 provincias y 3 comarcas. Su mayoría están localizadas en lugares de difícil acceso, ofrecen el uso de Internet a precio módico, y brindan capacitación en diversas tecnologías de punta a residentes de estas comunidades. Para su conectividad utilizan tecnología de banda ancha de 10 Mbps, Microondas de 4 y 6 Mbps, DSL 6 Mbps y para algunos casos Internet satelital de 1 Mbps, la distribución de estas tecnologías dependerá del acceso que se tenga en las diferentes comunidades [20].

6) Proyecto 151: Se enfoca en el suministro e instalación de fibra óptica y servicio de Internet simétrico de 10 Mbps, para 151 escuelas del MEDUCA, impactando a la comunidad de Tulú, particularmente al Centro Educativo Básico General El Caimital [19].

Aunque se tratan de iniciativas innovadoras, con miras a brindar soluciones factibles al problema existente de conectividad digital a nivel nacional, la continuidad y sostenibilidad de estos proyectos, al igual que los cambios en la política local, representan una problemática a tratar que afecta directamente en el desarrollo de las comunidades, especialmente las rurales. Este hecho, da lugar a un escenario de carencias tecnológicas, poniendo de manifiesto la vulnerabilidad de estas comunidades frente al impacto de la brecha digital en nuestros días.

III. Caso de estudio: Corregimiento de Tulú

Como primera parte de este estudio se caracterizó el corregimiento de Tulú utilizando la información recabada en campo y obtenida de publicaciones oficiales considerando aspectos sociales, demográficos y económicos de la región para obtener una mayor compresión de la situación actual de este corregimiento.

Tulú es uno de los corregimientos que conforman el distrito de Penonomé, provincia de Coclé, está localizado en la región norte de Penonomé a 39 Km del centro. Su superficie se extiende desde la desembocadura del Río Tulú hasta el Río Cuiria, con un área aproximada de 194.6 Km^2 posee una topografía quebrada y una densidad poblacional de 4,624 habitantes por Km^2 [21]. Conformado por 38 comunidades, alrededor de 1200 viviendas, en donde aproximadamente el 48% de los habitantes están en edades escolares (ver Figura 2). Las principales actividades económicas son la agricultura de subsistencia y la artesanía (fabricación de sombreros), con ingresos inferiores a los 80 dólares mensuales.

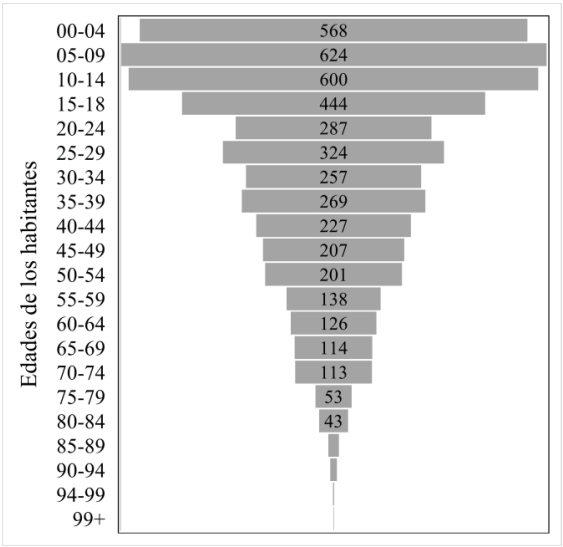


Fig. 2. Distribución por edad de la población del Corregimiento de Tulú, Datos Instituto Nacional de Estadisticas y Censo Panamá.

La Tabla 1 muestra la matrícula estudiantil obtenida en los diferentes Centros de Enseñanza Básica General (CEBG) del corregimiento de Tulú para el año 2022. Como se puede observar, actualmente este corregimiento tiene una población estudiantil de 850 estudiantes distribuidos en 18 centros educativos oficiales en los niveles de Preescolar, Primaria y Premedia. De los cuales solo 6 centros imparten el nivel de Premedia en las modalidades de Multigrado y Telebásica. Mientras que en el resto solo se imparten los niveles de Preescolar (modalidades Formal y no formal) y primaria (modalidad multigrado). Adicionalmente, se imparte un Bachiller en Turismo (educación nivel media) en el CEBG de Tulú con una matrícula de 24 estudiantes.

TABLA 1. MATRÍCULA ESTUDIANTIL CORREGIMIENTO DE TULÚ

Centro Educativo	Niveles de Escolaridad			Total
	Preescolar	Primaria	Premedia	
C.E.B.G. Las Pozas		Multigrado (1)		4
C.E.B.G. Las Minas	Formal	Multigrado (3)		62
C.E.B.G. Perecabe	Formal	Multigrado (3)		55
C.E.B.G. Asuncion Moran H.	No Formal	Multigrado (2)	Multigrado	73
C.E.B.G. La Pedregosa		Multigrado (1)		23
Esc. Boca de Cuiria	No Formal	Multigrado (2)	Multigrado	65
Boca de Tulú	No Formal	Multigrado (2)	Multigrado	60
Esc. Lura	Formal	Multigrado (4)	Tele básica	92
Esc. San Isidro	No Formal	Multigrado (2)	Tele básica	76
Esc. San Pablo		Multigrado (1)		17
Esc. San Vicente		Multigrado (1)		18
C.E.B.G. Unión Santeña		Multigrado (1)		21
Buena Vista	No Formal	Multigrado (2)		28
Esc. La Tulúa		Multigrado (1)		11
Esc. Las Marinas		Multigrado (2)		32
Esc. Luracito Arriba		Multigrado (2)		25
Esc. Nuevo San Antonio		Multigrado (2)		30
Esc. Tulú	Formal	Multigrado (4)	Multigrado	158

La segunda parte de este estudio consistió en identificar la proximidad de las antenas (radio bases) de telecomunicaciones móvil LTE existentes en la región con respecto a los centros escolares de Tulú. Para ello, se realizó un análisis de la cobertura digital utilizando la base de datos suministrada por la Autoridad de los Servicios Públicos en Panamá (ASEP), que contiene la ubicación de las antenas LTE [22].

Inicialmente, se identificó cada una de las antenas LTE a nivel global en la provincia de Coclé (264 antenas). Como se muestra en la Figura 3, las antenas LTE de los diferentes operadores de servicio móvil están identificadas con pequeños círculos de diversos colores. Después, se identificaron los centros escolares ubicados al norte del distrito de Penonomé. Los mismos aparecen resaltados con banderas rojas. Se estableció como punto de referencia el CEBG de Tulú, por su trayectoria en los últimos años, en cuanto mayor población estudiantil, así como también, la mayor cantidad de niveles escolares vigentes.

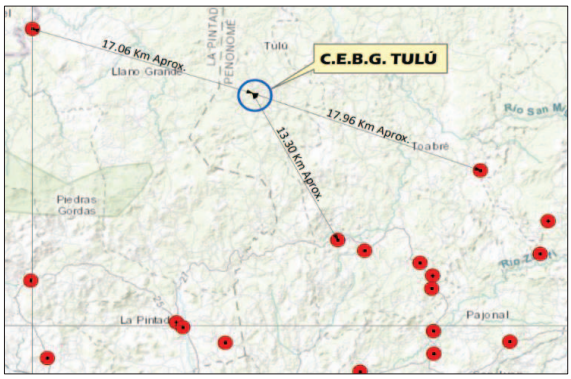


Fig. 3. Distribución de las antenas de telecomunicaciones móvil LTE en la Provincia de Coclé.

La Figura 4 muestra la distancia comprendida entre el CEBG de Tulú y la antena LTE más cercana, la cual está ubicada aproximadamente a 13.3 km, con un radio de cobertura superior de 5 km que ofrecen los operadores en regiones apartadas o zonas rurales.

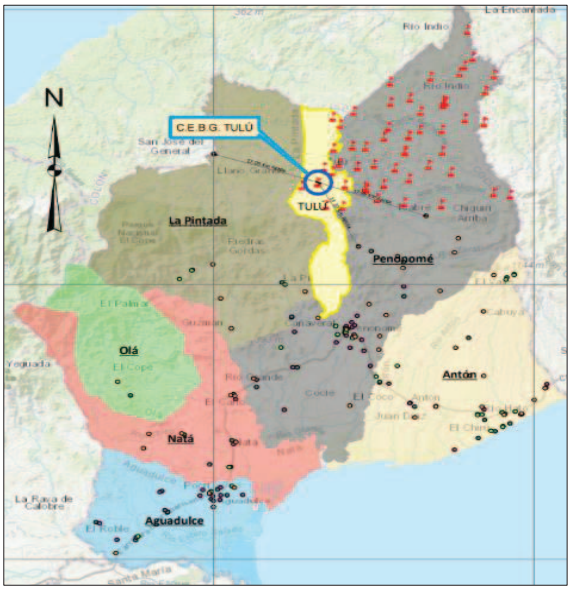


Fig. 4. Distribución de las antenas de telecomunicaciones móvil LTE en la región norte del Distrito de Penonomé.

Mientras que las otras dos radios bases se encuentran a una distancia de 17.06 km y 17.96 km del punto de referencia, respectivamente.

Adicionalmente, también se deben considerar otros aspectos que influyen negativamente en la cobertura definida por la tecnología, aspectos tales como: la altura de la radio base, la potencia de transmisión, el ángulo de radiación y las barreras naturales existentes en el medio de transmisión. Por lo que el aprovechamiento de este servicio es limitado o nulo en esta región. Debido principalmente a la topografía compleja y al radio de cobertura.

Este primer acercamiento nos permite conocer la situación actual de las comunidades rurales, dejando al descubierto enormes limitaciones de cobertura que impiden a la población de estas regiones estar conectado, lo que aumenta aún más la brecha digital. Así también, se pudo identificar que existen oportunidades para el fortalecimiento en cuanto a alfabetización digital a través del desarrollo e implementación de tecnologías/herramientas sostenibles que apoyen el desarrollo de capacidades de los habitantes de estas regiones apartadas tecnológicamente.

A. Impacto de la conectividad digital en zonas rurales

Con la llegada de la pandemia por COVID-19, las comunidades rurales que no cuentan con servicios de conectividad digital evidenciaron la gigantesca brecha que los separa de oportunidades.

Por ejemplo, ante esta situación, se hizo inminente la necesidad del uso de las tecnologías, por lo que se ofrecieron soluciones digitales que abarcaban aplicaciones para conocer desde los resultados de las pruebas de hisopados, hasta sistemas en línea para verificar el esquema de vacunación del ciudadano panameño. Servicios, a los cuales estas

comunidades no tuvieron acceso, debido a las carencias de conectividad a Internet, la falta de conocimientos, equipos informáticos, entre otros.

Por lo tanto, el desarrollo de competencias digitales para promover la adopción y uso de diversas soluciones tecnológicas pasa por la creación de capacidades en donde la inclusión es fundamental. Es por ello, que al identificar las necesidades existentes en la comunidad de Tulú, se pudieron caracterizar las actividades que podrían mejorarse, entre ellas:

1. La agricultura: Actividad que actualmente, se desarrolla para la subsistencia, con un efectivo uso de información podría mejorar el sistema de siembra, la protección de los cultivos, la mejora de la fertilidad del suelo y conocer el estado del clima, permitiría a los agricultores prepararse para eventos esporádicos como inundaciones, sequías o incluso brotes de plagas y enfermedades, evitando así una pérdida significativa de los cultivos [21].

2. Los s*istemas de Alerta Temprana:* Tomando en consideración la falta de carreteras, vados y puentes, y una topografía compleja, compuesta de montañas y caudalosos ríos, que ponen en peligro las vidas de estudiantes y los habitantes de esta zona, un sistema de alerta temprana proporcionaría apoyo a la gestión de desastres, ayudando a salvaguardar pérdidas humanas [23].

3. La telemedicina: Otra de las grandes ventajas con que puede contar esta comunidad, es la telemedicina. Proveer de atención sanitaria clínica a distancia, evitaría los grandes costos que deben asumir sus habitantes al trasladarse a centros de salud más completos. También, la comunicación con especialistas que puedan brindar educación sanitaria a distancia, representaría grandes pasos en la prevención y tratamientos tempranos de enfermedades [23].

4. El comercio Electrónico: El uso y promoción de plataformas de comercio electrónico, podría apoyar la compra y venta de productos agrícolas y artesanales. Ayudaría a mostrar su cultura y promover el turismo de la región, pudiendo convertirse en una excelente y potencial oportunidad de mejorar sus ingresos.

5. La educación: Sin duda, una de las actividades más beneficiosas para la comunidad de Tulú y otras similares, es la educación. La capacidad de proporcionar alfabetización digital a los ciudadanos, y garantiza un uso eficiente de la tecnología, crearía un conjunto de habilidades que abrirían muchas oportunidades para esta comunidad.

Tener las mismas oportunidades que el resto del país, sería un logro importante, traduciéndose en progreso humano, económico y cultural en las zonas rurales del país.

IV. CONCLUSIONES

Las TIC se han considerado como los principales vehículos de innovación de las que depende el crecimiento económico, en general, y la generación de nuevas oportunidades para las regiones rurales, en particular. Por lo que, se espera que generen efectos positivos y sinérgicos sobre todos los elementos que constituyen la competitividad empresarial y territorial. Sin embargo, en la actualidad esta relación estratégica no está estrechamente relacionada con la existencia, adopción y uso de tecnologías en estas regiones.

Al respecto, fue posible conocer que la problemática de conectividad digital tiende a ser una constante por la falta de infraestructuras de telecomunicaciones y de las inversiones requeridas, las cuales incluyen servicios básicos como electricidad y el acceso vial terrestre. A pesar de que el gobierno panameño, gestiona múltiples programas e iniciativas para acortar distancias en esta brecha digital, los recursos y priorización de éstos, no consideran en muchos casos, regiones como la analizada en este trabajo. Esto se puede traducir como una continuidad a problemas subyacentes como la pobreza multidimensional, la deserción escolar, la exclusión social y en un grado importante, el aislamiento digital.

Abordar los vacíos de información sobre el estado real y actual de la situación en la conectividad rural, es de suma importancia para el desarrollo y avance de un país. De ahí, la relevancia de este tipo de estudios, cuyas contribuciones, son necesarias para ofrecer de manera objetiva, conocimiento sobre las verdaderas carencias y, sobre todo, en la apertura de espacios de solución tecnológicas que sean viables y sostenibles en el tiempo.

Finalmente, Panamá debe enfrentar algunos desafíos para alcanzar su objetivo de proveer de conectividad a las zonas rurales del país con las implicaciones asociadas. Por lo que, se deben establecer políticas justas, comprometidas y continuadas que procuren incluir estas regiones, aportando a planes integrales de salud, educación y bienestar, que sean metas de estado a largo plazo.

De cara a futuros trabajos, aportaremos mediciones específicas de conectividad digital en Tulú teniendo en cuenta los principales proveedores de servicios móvil. Del mismo modo, que se analizarán las oportunidades de implementación de proyectos sostenibles de innovación social de base tecnológica con miras a favorecer el desarrollo de las actividades de la comunidad y su inclusión social.

REFERENCIAS

[1] J. E. Prieger, "The broadband digital divide and the economic benefits of mobile broadband for rural areas," *Telecomm. Policy*, vol. 37, no. 6, pp. 483–502, 2013, doi: 10.1016/j.telpol.2012.11.003.

[2] P. Biggs, *The State Of Broadband 2016: Broadband Catalyzing Sustainable Development*. Geneva, Switzerland: ITU, 2016.

[3] L. Townsend, A. Sathiaseelan, G. Fairhurst, and C. Wallace, "Enhanced broadband access as a solution to the social and economic problems of the rural digital divide," *Local Econ.*, vol. 28, no. 6, pp. 580–595, 2013, doi: 10.1177/0269094213496974.

[4] S. Skerratt, "Hot Spots and Not Spots: Addressing Infrastructure and Service Provision through Combined Approaches in Rural Scotland," *Sustainability*, vol. 2, no. 6, pp. 1719–1741, 2010, doi: 10.3390/su2061719.

[5] UN-DESA, *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. New York: United Nations, 2019. doi: 10.18356/b9e995fe-en.

[6] R. Katz, F. Callorda, and J. Jung, "El estado de la digitalización de América Latina frente a la pandemia de la COVID-19," *Rev. Latinoam. Econ. y Soc. Digit.*, 2020, doi: 10.53857/GQOL2178.

[7] S. Ziegler, J. Arias Segura, M. Bosio, and K. Camacho, "Conectividad rural en América Latina y el Caribe. Un puente al desarrollo sostenible en tiempos de pandemia," 2020, [Online]. Available: https://repositorio.iica.int/handle/11324/12896

[8] SELA, "Conectividad digital rural: un desafío clave para el desarrollo de América Latina y el Caribe." 2021. Accessed: Jul. 08, 2022. [Online]. Available: https://www.sela.org/media/3222989/if-conectividad-digital-rural.pdf

[9] UNCTAD, "Panamá Examen de la Política de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá," *Organ. Mund. del Comer.*, vol. 4, pp. 8–32, 2019.

[10] A. García Zaballos, R. Martínez Garza, P. Puig Gabarró, C. Schneider Talavera, and E. Iglesias Rodríguez, "La situación actual y los desafíos del sector de telecomunicaciones de {Panamá}," 2021, doi: 10.18235/0003635.

[11] DataReportal, "Digital 2022: Panamá," *DataReportal – Global Digital Insights*. 2022. Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://datareportal.com/reports/digital-2022-panama

[12] M. Khalil and F. U. Khan, "Exploration of TCP Parameters for Enhanced Performance in a Datacenter Environment," in *2018 4th International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)*, 2018, pp. 65–69. doi: 10.1109/ICEESE.2018.8703553.

[13] M. Khalil, A. Khalid, F. U. Khan, and A. Shabbir, "A Review of Routing Protocol Selection for Wireless Sensor Networks in Smart Cities," in *2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2018, pp. 610–615. doi: 10.1109/APCC.2018.8633456.

[14] AN-Panamá, "Ley No. 294 - Gaceta Oficial No. 29511-B." 2022. Accessed: Aug. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29511_B/91117.pdf

[15] ONU, "Resolución A/RES/70/1 Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible." 2015. [Online]. Available: https://undocs.org/es/A/RES/70/1

[16] MIRE-Panamá, "Decreto Ejecutivo No. 393 - Gaceta Oficial No. 27870-B." 2015. Accessed: Aug. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/27870_B/52756.pdf

[17] AN-Panamá, "Ley No. 197 - Gaceta Oficial No. 29219-A." 2021. Accessed: Aug. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29219_A/83503.pdf

[18] MEDUCA-Panamá, "Plan Educativo Solidario." 2021. Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.meduca.gob.pa/node/3904

[19] AIG-Panamá, "Agenda Digital 2021." 2021. Accessed: Aug. 02, 2022. [Online]. Available: https://aig.gob.pa/documentosaig/agenda-digital/

[20] Infoplazas, "Infoplazas A.I.P Panamá - Centros Comunitarios de Información." 2022. Accessed: Jul. 12, 2022. [Online]. Available: https://www.infoplazas.org.pa/

[21] Municipio-Penonomé, "Municipio de Penonomé." 2022. Accessed: Aug. 01, 2022. [Online]. Available: https://penonome.municipios.gob.pa/

[22] ASEP-Panamá, "Torres y Antenas." 2021. Accessed: Jun. 05, 2022. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/?page_id=11883

[23] CEPAL, "Universalizar el acceso a las tecnologías digitales para enfrentar los efectos del COVID-19." 2020. Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/handle/11362/45938

EPIDEMIOLOGICAL MODELING WITH SIR AND ARIMA DYNAMIC MODELS AND MACHINE LEARNING TO PREDICT THE FUTURE BEHAVIOR OF COVID-19 IN PANAMA

MODELADO EPIDEMIOLÓGICO CON LOS MODELOS DINÁMICOS SIR Y ARIMA Y APRENDIZAJE AUTOMATIZADO PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO FUTURO DEL COVID-19 EN PANAMÁ

Roberto Castillero[1], Jaime Esquivel[1], Humberto Alvarez[2] & Víctor López[3]
[1]Licenciatura en Ingeniería Industrial y Mecánica Industrial-Facultad de Ingeniería Industrial-Universidad Tecnológica de Panamá
[2]Departamento de Producción - Facultad de Ingeniería Industrial-Universidad Tecnológica de Panamá
[3]Departamento de Sistemas de Información, Control y Evaluación de Recursos Informáticos-Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales-Universidad Tecnológica de Panamá

Abstract
Mathematical models SIR and ARIMA were used, within an epidemiological approach, to adjust them to the COVID-19 pandemic data in Panama to establish a scientific criterion for taking decisions for the effects control that this pandemic has brought. Based on the predictions made from the adjustments of these models, it was concluded that they can be adjusted correctly to the data, allowing to make short-term predictions in a satisfactory way, however, if a more accurate model were to be carried out, independent variables could be included, besides time, such as mobility restrictions. This work lays down the foundations for future investigations of epidemiological models in Panama due to its exposition of mathematical model's comparison used to analyze the behavior of the COVID-19 Pandemic. Jupyter Notebook, GitHub, Machine Learning libraries and mathematical software such as Wolfram Mathematica were used. Adjustment of data was performed through statistical techniques and, for this prediction, statistical software Minitab and E-Views were also used.

Keywords Epidemiological model, neural network, COVID-19, Machine Learning, SIR model, ARIMA model.

Resumen
Se utilizaron los modelos matemáticos SIR y ARIMA con un enfoque epidemiológico para ajustarlos a los datos de la pandemia del COVID-19 en Panamá y establecer un criterio científico con el cual se puedan tomar decisiones en el control de efectos que esta pandemia ha traído. Nos basamos en las predicciones realizadas del ajuste de estos modelos para concluir que estos se ajustan de manera correcta a los datos, arrojando predicciones a corto plazo de manera satisfactoria. Sin embargo, estos modelos se fundamentan en la tendencia de los datos, por lo que de requerirse un modelo más preciso se podrían incluir variables independientes, además del tiempo, como las restricciones de movilidad. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones de modelos epidemiológicos en la República de Panamá al exponer una comparativa de modelos matemáticos utilizados para analizar el comportamiento de la Pandemia del COVID-19. Se utilizó Jupyter Notebook, GitHub, librerías de Machine Learning y softwares matemáticos como Wolfram Mathematica. Los datos se ajustaron mediante técnicas estadísticas y, para esta predicción, también se utilizaron los softwares estadísticos Minitab y E-Views.

Palabras claves Modelo epidemiológico, red neuronal, COVID-19, aprendizaje automatizado, modelo SIR, modelo estocástico, modelo financiero, modelo econométrico, modelo ARIMA.

*Corresponding author: Humberto.alvarez@utp.ac.pa

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00049

1. Introducción

Entre las ramas de la ciencia que auxilian el modelado y predicción de una enfermedad infecciosa está la epidemiología, la cual estudia el comportamiento de las enfermedades humanas y animales mediante el seguimiento de variables como la distribución poblacional, comportamiento y control de factores relacionados con la salud. El virus SARS-CoV2 entra dentro del estudio de la epidemiología, en la que se hace imprescindible el uso de herramientas adaptativas, tal como la inteligencia artificial o el aprendizaje automatizado, para buscar crear modelos que pronostiquen el comportamiento del virus y ayuden a tomar las medidas sanitarias necesarias para garantizar la seguridad de la población.

2. Modelo epidemiológico SIR

2.1. Marco Teórico

El modelo SIR es determinista basado en ecuaciones diferenciales y es un modelo compartimental.

Figura 1. Compartimentos del modelo SIR. Fuente: Jaime Esquivel

En la figura 1, primero se tiene el segmento de población que es susceptible a contraer la enfermedad (S), luego el segmento que ya contrajo la enfermedad y que representa un caso activo (I). Por último, el segmento que se recuperó de la enfermedad (R).

El modelo utilizado consta de tres compartimentos que son excluyentes. Las ecuaciones diferenciales que gobiernan el modelo SIR son:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta S(t) I(t)}{N} \qquad S(0) = S_0 \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta S(t) I(t)}{N} - \gamma I(t) \qquad I(0) = I_0 \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I(t) \quad (3)$$

$$Rt = R_0 \frac{S}{N} \quad (4) \quad \text{Y} \quad R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \quad (5)$$

Donde: **N:** Población total; **S(t):** Número de personas susceptibles en el tiempo t; **I(t):** Número de personas infectadas en el tiempo t; **R(t):** Número de personas recuperadas en el tiempo t; **β:** Número de infecciones que ocasionará una persona infectada por unidad de tiempo t; **D:** Número de días en los que una persona se encuentra infectada puede transmitir el virus efectivamente; **γ:** Proporción de infectados que se recuperan por unidad de tiempo t ($\gamma = 1/D$); **R_0:** Número total de personas a las que un individuo infectado les transmite el virus. También llamado número de reproducción básico ($R_0 = \beta / \gamma$) [1]; **Rt**: Número de reproducción del virus en diferentes momentos de la pandemia, este es proporcional a la cantidad de población susceptible y está relacionado con el R0, también llamado número de reproducción efectivo [2].

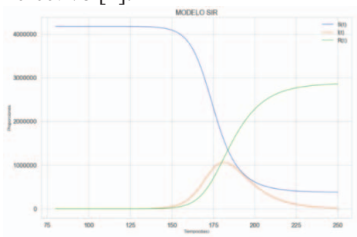


Figura 2. Gráfico que describe el comportamiento del modelo SIR en el tiempo. Curva azul susceptibles, curva verde recuperados, curva roja infectados. Fuente: Jaime Esquivel

El modelo SIR de la figura 2, posee dos parámetros que son los que modifican su comportamiento en el tiempo: la tasa de infección (β) y la tasa de recuperación (γ). Los valores de los parámetros provienen de los datos del virus del COVID-19.

2.2. Metodología

2.2.1. Recopilación de Datos

Los datos utilizados comprendieron desde el 9 de marzo de 2020, día del primer caso de COVID-19 en Panamá, hasta el día 28 de febrero del 2021. Este periodo de tiempo presentó un acumulado de datos de 357 en unidad de medida de día, donde cada punto o dato representó un día.

2.2.2. Infectados y defunciones confirmadas, diarias y acumulativas

Estos datos usados son los albergados en Our World in Data (OWID), que recopila datos del Centro Europeo de Prevención y Control de Enfermedades (ECDC).

2.2.3. Pruebas realizadas diarias y acumulativo

Estos datos se recolectaron igualmente a través de OWID. Para la República de Panamá, la información se recolectó del Ministerio de Salud a través del Dashboard COVID-19.

2.2.4. Acumulado de Recuperados

Se recurrió al Repositorio GitHub del Center for Systems Science and Engineering (CSSE) de la Universidad John Hopkins para obtener estos datos.

2.2.5. Tratamiento y manipulación de los datos

Una vez recopilada la información, para procesarla se procedió a clasificarla y ordenarla por etapas:

1. Extraer toda la información de Panamá.
2. Establecer qué datos de variables se utilizarían, como lo fueron: Nuevos casos diarios, Acumulativo de casos confirmados, muertes diarias, muertes diarias acumuladas y nuevas pruebas realizadas por día, recuperados diarios, recuperados totales.

3. Rellenar datos faltantes y convertir formatos de fecha al formato DD-MM-AA. Para el modelo ARIMA, se eliminaron todas las filas cuyas fechas correspondían a ceros y valores atípicos, de manera que la secuencia fuera ininterrumpida.

4. Colocar las fechas de los reportes como el índice de los datos.

2.3 Resultados

El ajuste de todo modelo SIR proyectado fue estimado con la regresión de mínimos cuadrados. A continuación, se muestra dicho ajuste mediante la integración de las ecuaciones, utilizando como valores iniciales la cantidad de casos iniciales (I0) reportada el 9 de marzo de 2020, la cantidad de recuperadas iniciales (R0) como cero y la población susceptible (S0) como la población total de Panamá menos la cantidad de infectadas iniciales (N-I0). En la figura 3, se muestra el ajuste de los datos de los casos acumulados y los valores que permitió obtener en la tabla 1.

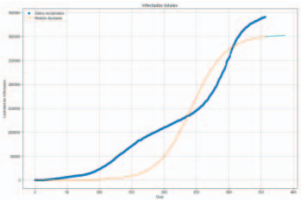


Figura 3. Datos de casos acumulados en puntos azules y curva del modelo ajustado en naranja. Obtenemos ajuste de parámetros beta (β)= 1.0772, gamma (γ)= 1.038655, I0=0 y N=4278500 con RMSE=38632.859, hasta el día 28 de febrero de 2021. Fuente: Jaime Esquivel

Tabla 1 Valores de parámetros obtenidos después del ajuste del modelo SIR. Fuente: Jaime Esquivel

Parámetro	Valor
B	1.0772
Γ	1.0386
R0	1.0371
N	4278500

2.3.1. Ajuste del modelo SIRD utilizando funciones de integración de ecuaciones diferenciales y optimización de curva en Python.

En la figura 4, se observó el ajuste del modelo SIRD mediante la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales. Sin embargo, en esta, se adicionó la variable de las defunciones totales a través del tiempo.

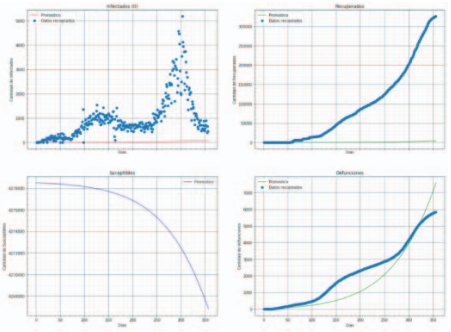


Figura 3. Resumen del comportamiento del modelo SIRD con los valores de parámetros ajustados. Puntos azules son los datos reales, y las líneas continuas representan el modelo ajustado Fuente: Jaime Esquivel

2.3.2. Modelo de [3] para ajuste del modelo de defunciones diarias y curva de número de reproducción básica

En las figuras 5, 7 y 9, el ajuste no fue sensible a los valores extremos de los datos, pero captó la tendencia general en sus respectivas variables aun con gran variabilidad en datos como extremos y dispersos.

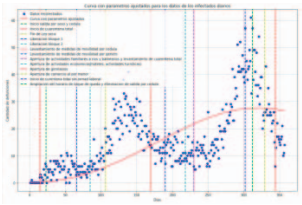


Figura 4. Modelo Atkinson con parámetros ajustados para conjunto de datos de defunciones, el día 0 representa el 9 de marzo de 2020. Con parámetros ajustados a valores de a = 366.4377, b = 3 (fijo), c= 3.8186e-15, d =8.6096 y t0=0 (asumido). RMSE= 10.3841. Fuente: Jaime Esquivel

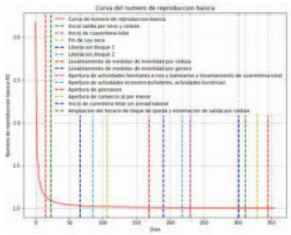


Figura 5. Ajuste de modelo de número de reproducción básica (R0), con gamma (γ) = 0.92 y t0=0. Fuente: Jaime Esquivel

En la figura 6, que pertenece a la variante del modelo SIR, propuesto por [3], se presentó el caso de la curva del número de reproducción básica (R0) a lo largo del tiempo y se observó un fenómeno de descenso continuo, dentro de los primeros 25 días aproximadamente, que pudo ser por alguna irregularidad en el modelo o método de ajuste, o porque el R0 no dependió del comportamiento visual.

En Panamá, el número de reproducción básica es un indicador para tomar medidas contra la pandemia, como las restricciones de movilidad; este indicador informa sobre la velocidad con la que se esparce el virus [4].

En las figuras 7 y 8, se tomó el valor de gamma como 0.9 de la figura 6 y la tasa de mortalidad mu como 0.015 según lo descrito por [5].

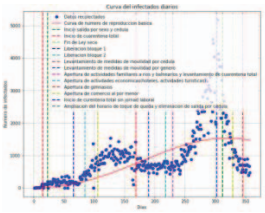


Figura 6. Curva de infectados diarios con gamma=0.92 y mu=0.02. Día 0 representa el 9 de marzo de 2020. RMSE=686.2453. Fuente: Jaime Esquivel

En la figura 7 el pronóstico con RMSE representó un mejor ajuste que el modelo de la figura 6 que tuvo RMSE de 761.24.

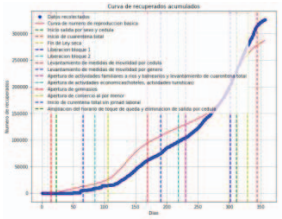


Figura 7. Curva de infectados diarios con gamma=0.92 y mu=0.015. El día 0 representa el 9 de marzo de 2020. RMSE=20324.1997. Fuente: Jaime Esquivel

En la figura 8, se apreció buen ajuste y pronóstico visual, mas no esta respaldado por su alto RMSE.

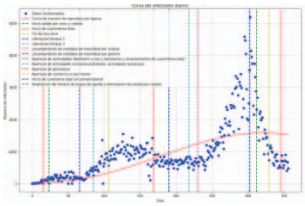


Figura 8. Curva de infectados diarios con valor de parámetros ajustados gamma=0.8583 y mu=0.0204. Dia 0 representa el 9 de marzo de 2020. RMSE=682.9344. Fuente: Jaime Esquivel

Desde el día 1 hasta el día 65 aproximadamente, existió una tendencia en los datos en la figura 9: un “pico” en los contagios alrededor del día 40 y, luego, un descenso hasta el día 65 catalogable como la ¨primera ola¨ de contagios. Después del día 75 aproximadamente al día 190, otro pico que fue la ¨segunda ola¨ y, por último, del día 230 al presente, se dio la ¨tercera ola¨ que alcanzó picos en número de casos reportados diarios; cada ola aumenta en tamaño con respecto a la anterior.

2.3.3. Modelo SIRD Paramétrico con Wolfram Mathematica

En el desarrollo del modelo SIRD dentro de la herramienta Wolfram Mathematica, el modelo se define primero como paramétrico no lineal de ecuaciones diferenciales.

Tabla 2. Resumen de ajuste de parámetros para el modelo SIRD, con valor ajustado de parámetros y error estándar. Fuente: Jaime Esquivel

	Estimate	Standard Error
betta	0.75971	0.00306628
gamma	0.719509	0.00608747
mu	0.01859	0.00508279
I0	64.885	0.215533

En la tabla 2 se muestran los valores para los resultados presentados a continuación por cada variable.

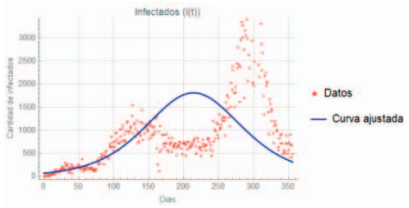


Figura 9. Curva de infectados ajustada con parámetros beta= 0.75971, gamma=0.719509, mu=0.01859, I0=64.885. Con RMSE=934.437. El día 0 representa el 9 de marzo de 2020. Fuente: Jaime Esquivel

En la figura 10 se muestra el ajuste del modelo paramétrico SIRD de la variable de infectados diarios, donde la línea azul representa el pronóstico. Los datos fueron dispersos, pero marcaron su tendencia.

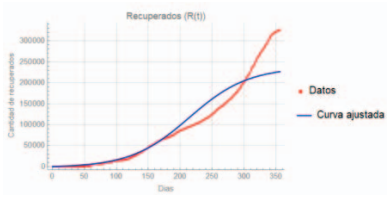


Figura 10. Curva de recuperados ajustada con parámetros beta= 0.75971, gamma=0.719509, mu=0.01859, I0=64.885. Con RMSE=30,028.4. El día 0 representa el 9 de marzo de 2020. Fuente: Jaime Esquivel

En la figura 11, el ajuste estuvo cercano a los datos para varios puntos visualmente, pero su alto RMSE indicó lo contrario.

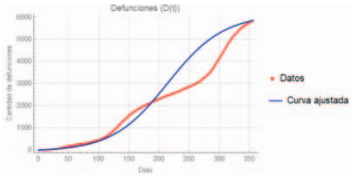


Figura 11. Curva de defunciones ajustada con parámetros beta= 0.75971, gamma=0.719509, mu=0.01859, I0=64.885. Con RMSE=680.143. El día 0 representa el 9 de marzo de 2020. Fuente: Jaime Esquivel

Para defunciones acumuladas de la figura 12 se aprecia un ajuste visualmente bueno, sustentado en el pronóstico con valor RMSE de 680.143. Este modelo presentó el valor de RMSE más bajo, siendo así el más apto para pronósticos de esta variable.

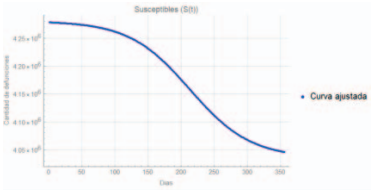


Figura 12. Curva de Susceptibles con valores de parámetros ajustados de beta= 0.75971, gamma=0.719509, mu=0.01859, I0=64.885., N= 4,278,500 y S0= N-I0. El día 0 representa el 9 de marzo de 2020. Fuente: Jaime Esquivel

Mientras, en la figura 13, la curva ajustada de susceptibles denotó un descenso de la población no infectada con el pasar de los días, lo que hace sentido solo si se toma la extensión total de defunciones e infectados.

3. Modelo ARIMA

Las series de tiempo que conforman modelos ARIMA son del tipo univariante. [5] El modelo ARIMA se descompone de la siguiente manera: AR: Auto regresión. [6]; I: Integrado; MA: Moving Average o Promedio Móvil. [7]

3.1. Estacionalidad

Existen otros modelos ARIMA que tienen ciertas particularidades; la estacionalidad es una de estas. Una serie temporal es estacional cuando es afectada por factores temporales (la hora del día, la semana, el mes, el año, etc.). [8]

Los modelos ARIMA estacionales o SARIMA, de fórmula SARIMA(*p,d,q*)x(*P,D,Q*)*m,* cuentan con los términos adicionales *P y p*; *D y d*; *Q y q*; *"m" o "s"*: extensión de la estacionalidad. [9]

Como ejemplo de ecuación de un modelo ARIMA estacional multiplicativo, el modelo ARIMA $(1,1,1) \times (1,1,1)_4$ (sin constante) es para datos cuatrimestrales (m=4) y puede escribirse como [10]:

$$(1-\phi_1 B)\,(1-\Phi_1 B^4)\,(1-B)\,(1-B^4)y_t = (1+\theta_1 B)\,(1+\Theta_1 B^4)e_t. \quad (6)$$

(Non-seasonal AR(1)) (Seasonal AR(1)) (Non-seasonal difference) (Seasonal difference) (Non-seasonal MA(1)) (Seasonal MA(1))

3.2. Metodología

El modelo SARIMA, como modelo de pronóstico, se elaboró de acuerdo con la metodología Box-Jenkins; consta de los siguientes tres pasos [7]: Identificación: Usar datos para dar con una subclase del modelo que resuma mejor la data; estimación: estimar parámetros c, ϕ1, …, ϕp, θ1, …, θq con métodos como el de máxima verosimilitud [11]; comprobación de diagnóstico: Probar que el modelo no es adecuado con sobreajuste (Relacionado al principio de parsimonia [12] y el criterio AIC [13]) y errores del Residual [7].

3.3. Transformación Box-Cox

Entre las transformaciones aplicables en series temporales para conseguir varianza constante en residuales, existe la familia de transformaciones Box-Cox; las cuales requieren requiere del parámetro λ, que actúa como exponente. [11]

3.4. Resultados

3.4.1. Conclusiones con metodología Box-Jenkins

Las series de una única diferenciación estacional, con o sin Box-Cox, se usaron como opción alterna a la doble diferenciación regular y estacional; el uso de una única diferenciación estacional no es consecuencia de las conclusiones de otras series, si no del deseo de observar y comparar resultados y pronósticos.

Tabla 3 Resumen de conclusiones en resultados siguiendo la metodología Box-Jenkins. Fuente: Roberto Castillero

Serie Temporal	Conclusión de Pruebas y Análisis
Casos Nuevos Vs. Fechas	No estacionaria, requirió diferenciación
Casos Nuevos (Diferencia Regular) Vs. Fechas	No estacionaria, requirió diferenciación estaciona
Casos Nuevos (Diferencia Regular y Estacional) Vs. Fechas	Estacionaria.
Casos Nuevos (Diferencia Estacional) Vs. Fechas	Estacionaria.
Casos Nuevos Transformados con Box-Cox Vs. Fechas	No estacionaria, requirió diferenciación.
Casos Nuevos Transformados con Box-Cox (Diferencia Regular) Vs. Fechas	No estacionaria, requirió diferenciación estacional.
Casos Nuevos Transformados con Box-Cox (Diferencia Regular y Diferencia Estacional m=7) Vs. Fechas	Estacionaria.
Casos Nuevos Transformados con Box-Cox (Diferencia Estacional m=7)	Estacionaria.

A partir de las series estacionarias de la tabla 3, identificadas con pruebas de raíz unitaria (la estacional, Canova-Hansen, y la no estacional, Dickey Fuller Aumentada), por inspección visual de sus gráficos en función del tiempo y de sus gráficos ACF y PACF, se estimaron los modelos SARIMA que fueron inferidos con el análisis de los gráficos ACF y PACF y determinados con la función de Autoarima del software E-Views.

A los residuales de los modelos tentativos inferidos de las series estacionarias sin Box-Cox, y de varios de Autoarima

seleccionados siguiendo el principio de parsimonia y considerando sus valores de Criterio de Información de Akaike (AIC) para evitar el sobreajuste, se les diagnosticó una varianza no constante en sus gráficos de Residuos vs Ajustes, lo que llevó a aplicar la familia de transformaciones Box-Cox a la serie original de Casos Nuevos Vs. Fechas para mejorar la varianza de los modelos que puedan determinarse, repitiéndose así iterativamente todo el proceso de la metodología Box-Jenkins.

Los residuales de los modelos tentativos inferidos de las series estacionarias con Box-Cox, y de varios de Autoarima seleccionados siguiendo el principio de parsimonia y considerando sus valores de Criterio de Información de Akaike (AIC) para evitar el sobreajuste, estuvieron sujetos a evaluación con sus gráficos ACF y PACF que confirmaron que mostraban comportamiento de ruido blanco y, también, con sus gráficos de Residuos vs. Ajustes que diagnosticaron una varianza todavía no constante, aunque sí ligeramente mejor en relación a modelos descartados.

3.4.2. Aplicación de Box-Cox

En la figura 14, se encuentra el resultado de la aplicación de Box-Cox a la serie temporal de los casos positivos diarios. Dado que el 1 no se encontró dentro del intervalo de 0.18 y 0.33, fue apropiado transformar, corroborando así las conclusiones de los gráficos de Residuos vs. Ajustes.

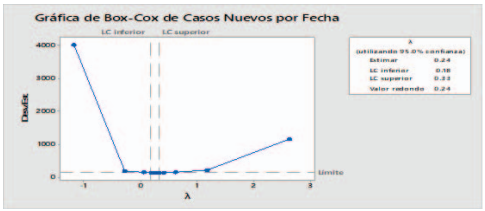


Figura 13. Gráfico de Desviación Estándar Vs. lambda (λ) como resultado de Box-Cox aplicado a la serie Casos Nuevos Vs. Fechas. Fuente: Roberto Castillero

Para los pronósticos, se revirtió la transformación de Box-Cox para exponerlos en la escala de la serie original. La reversión se llevó a cabo aplicando el parámetro lambda usado para transformar (λ = 0.24305), como exponente a la inversa (1/ λ), sobre cada observación de los pronósticos de los 4 modelos SARIMA no descartados.

3.4.3. Ecuaciones de Modelos ARIMA

La estimación se ejecutó a través del método de máxima verosimilitud junto con el método BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb and Shanno) de optimización de algoritmos y el algoritmo marquardt como método de paso. Así, se formuló a partir de la ecuación (6), la ecuación de los modelos sin constante y, tratándose de modelos con estacionalidad cada 7 días, en datos semanales (m=7); luego de formulados se reemplazó por sus valores estimados:

SARIMA (0,1,3)x(0,1,1)7

$$(1-B)(1-B^7)yt=(1+(-0.605865)B+(-0.005230)B^2+(-0.032453)B^3)(1+(-0.812639)B^7)\varepsilon t. \quad (7)$$

SARIMA (1,1,5)x(0,1,1)7

$$(1-(0.926341)B)(1-B)(1-B^7)yt=(1+(-1.541217)B+(0.559751)B^2+(-0.015832)B^3+(-0.048405)B^4+(0.097752)B^5)(1+(-0.839335)B^7)\varepsilon t. \quad (8)$$

SARIMA (1,0,6)x(0,1,1)7

$$(1-0.993796\ B)(1-B^7)yt=(1+(-0.614240)B+(-0.028366)B^2+(0.001707)B^3+(-0.093848)B^4+(0.021788)B^5+(0.134130)B^6)(1+(-0.844083)B^7)\varepsilon t. \quad (9)$$

SARIMA (1,0,2)x(0,1,1)7

$$(1-0.993828\ B)(1-B^7)yt=(1+(-0.601286)B+(-0.030672)B^2)(1+(-0.813648)B^7)\varepsilon t. \quad (10)$$

3.4.4. Ajuste modelos ARIMA

En las figuras 15, 16, 17 y 18, se apreció que los valores actuales y ajustados fueron bastante similares, a excepción de valores como los más prominentes de las fechas cercanas a 08/16/2020 o 08/17/2020, en las que los actuales se comportaron muy distinto a los ajustados; aunque los actuales evidenciaron valores levemente de mayor magnitud, estos siguieron muy de cerca el comportamiento de los ajustados.

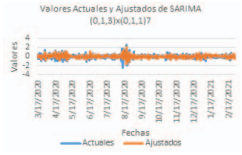


Figura 14. Valores Actuales y Ajustados de SARIMA (0,1,3)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

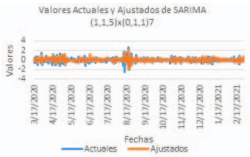


Figura 15. Valores Actuales y Ajustados de SARIMA (1,1,5)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

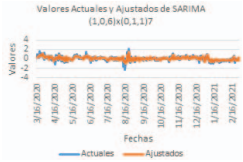


Figura 16. Valores Actuales y Ajustados de SARIMA (1,0,6)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

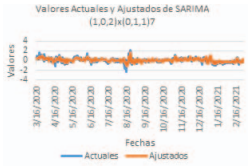


Figura 17. Valores Actuales y Ajustados de SARIMA (1,0,2)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

3.4.5. Pronósticos de modelos ARIMA

Se proyectaron, en las figuras 19, 20, 21 y 22, las observaciones de cada pronóstico y las de la serie real que abarcan las observaciones del mes de marzo de 2021; en dichas figuras, ambas series fueron similares tanto en el patrón que seguían, como en su decrecimiento, mas no así en su varianza ni en puntos en los que la serie color azul de Casos Nuevos contrastó con picos que acentuaron mucho más dicho patrón.

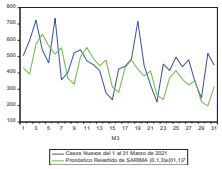


Figura 18. Comparación "Out of sample" del 1 al 31 de marzo de 2021 para la serie Casos Nuevos Vs. Fechas y el pronóstico del modelo SARIMA (0,1,3)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

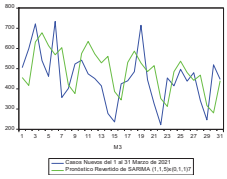


Figura 19. Comparación "Out of sample" del 1 al 31 de marzo de 2021 para la serie Casos Nuevos Vs. Fechas y el pronóstico del modelo SARIMA (1,1,5)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

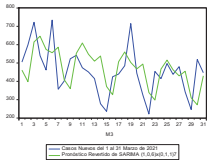


Figura 20. Comparación "Out of sample" del 1 al 31 de marzo de 2021 para la serie Casos Nuevos Vs. Fechas y el pronóstico del modelo SARIMA (1,0,6)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

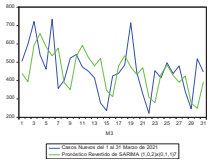


Figura 21. Comparación "Out of sample" del 1 al 31 de marzo de 2021 para la serie Casos Nuevos Vs. Fechas y el pronóstico del modelo SARIMA (1,0,2)x(0,1,1)7. Fuente: Roberto Castillero

4. Comparativa del ajuste de los modelos SIR, ARIMA, y Machine Learning, para la variable de infectados/positivos diarios

Para comparar ambos modelos, se utilizó el estadístico de R2 para medir el grado de ajuste, para la variable de infectados diarios de los modelos SIR y ARIMA.

Tabla 4. Cuadro comparativo del modelo SIR y ARIMA basados en el índice de correlación R2. Fuente: Jaime Esquivel

	SARIMA (0,1,3)x (0,1,1)7	SARIMA (1,1,5)x (0,1,1)7	SARIMA (1,0,6)x (0,1,1)7	SARIMA (1,0,2)x (0,1,1)7	SIRD (Liu et al., 2020)	SIRD Atkeson et al., 2020)	SIRD (Wolfram Mathematica Parametrica)	SIRD (Machine Learning (Relu))	SIR (Integración Ecuaciones diferenciales)
Casos Diarios	0.582805	0.597060	0.507753	0.492684	0.3362	0.3912	0.4497	-180.32	0.4781

Mediante la estimación del índice de correlación R2, el modelo estocástico ARIMA tuvo un mejor ajuste que el modelo SIR según la tabla 4. El resultado podría explicarse por los algoritmos o metodologías utilizadas.

5. Predicciones modelo SIR Vs. modelo ARIMA

En la tabla 5, para algunos pronósticos del modelo SIR, se obtuvo valores MAPE por encima del 100%, o sea que, los valores observados, están en ese porcentaje alejados de los valores de pronósticos; según la interpretación propuesta por [15], los modelos SIR expuestos poseen un pronóstico impreciso y no confiable, a excepción del modelo trabajado con Wolfram Mathematica, que entra dentro del rango razonable, al igual que el resto de modelos SARIMA cuyos valores MAPE fueron menos del 30%. Las predicciones fueron para los 31 días del mes de marzo de 2021.

Tabla 5 Cuadro comparativo de los pronósticos basados en los modelos SIR y ARIMA ajustados para los 31 días del mes de marzo, basados en el cálculo del MAPE. Fuente: Jaime Esquivel

	SARIMA (0,1,3)x (0,1,1)7	SARIMA (1,1,5)x (0,1,1)7	SARIMA (1,0,6)x (0,1,1)7	SARIMA (1,0,2)x (0,1,1)7	SIRD (Liu et al., 2020)	SIRD Atkeson et al., 2020)	SIRD (Wolfram Mathematica Paramétrica)	SIRD (Machine Learning (Relu))	SIR (Integración Ecuaciones diferenciales)
Casos Diarios	24.25%	28.86%	26.4%	24.67 %	632.79 %	232.82 %	46.075%	630.16%	56.75%

6. Conclusiones, trabajo futuro y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El modelo estocástico ARIMA resultó tener mejor grado de pronóstico que el modelo SIRD para la variable de infectados diarios.
- Se validó que la estructura que se identificó para el modelo permitió pronosticar el comportamiento de

las variables del modelo SIR con las mediciones de movilidad de Google para Panamá [16].

6.2. Trabajo a Futuro y Recomendaciones

- No se incorporó la variable de los individuos expuestos; sin embargo, considerando lugares focos de infección, se podría validar cuando un sujeto está expuesto al virus. Se recomienda incluir esta variable en una siguiente fase.
- La utilización de una base de datos pública fue limitada; una base precisa que no contenga valores iguales a cero o valores atípicos, proveería mejores resultados.

Agradecimiento

Agradecemos a la SENACYT por la financiación al proyecto "Modelado Dinámico del sistema médico-hospitalario ante la pandemia covid-19 en Panamá como sistema de monitoreo" a asesores de la UTP y a los revisores de este artículo.

Referencias

[1] H. Froese, «Infectious Disease Modelling: Beyond the Basic SIR Model,» 11 Abril 2020. [En línea]. Available: https://towardsdatascience.com/infectious-disease-modelling-beyond-the-basic-sir-model-216369c584c4.

[2] S. Cauchemez, N. Hoze, A. Cousien, B. Nikolay y Q. t. Bosch, «How modelling can enhance the analysis of imperfect epidemic data,» *Elservier,* p. 35, 2019.

[3] K. K. &. T. Z. Andrew Atkeson, «National Bureau of Economic Research. Estimating and forecasting disease scenarios for COVID-19 with a SIR model.,» Junio 2020. [En línea]. Available: https://www.nber.org/papers/w27335.

[4] R. C. Larson, «COVID-19 Math: You, Me, R0 and Rolling Re-entry,» 03 Abril 2020. [En línea]. Available: https://pubsonline.informs.org/do/10.1287/orms.2020.03.03/full/.

[5] J. H. University, «MORTALITY ANALYSES,» 2021. [En línea]. Available: https://coronavirus.jhu.edu/data/mortality.

[6] M. P. G. Casimiro, *Análisis de Series Temporales: Modelos ARIMA,* Obtenido de Universidad del País Vasco, 2009.

[7] J. Fernando, «Autoregressive,» Obtenido de Investopedia, 7 Octubre 2019. [En línea]. Available: https://www.investopedia.com/terms/a/autoregressive.asp.

[8] J. Brownlee, «A Gentle Introduction to the Box-Jenkins Method for Time Series Forecasting,» 13 Enero 2017. [En línea]. Available: https://machinelearningmastery.com/gentle-introduction-box-jenkins-method-time-series-forecasting/.

[9] B. Etienne, «Time Series in Python — Exponential Smoothing and ARIMA processes,» 9 Febrero 2019. [En línea]. Available: https://towardsdatascience.com/time-series-in-python-exponential-smoothing-and-arima-processes-2c67f2a52788.

[10] A. Graves, «Time Series Forecasting with a SARIMA Model,» 7 Enero 2020. [En línea]. Available: https://towardsdatascience.com/time-series-forecasting-with-a-sarima-model-db051b7ae459.

[11] A.-Y. E., «Application of ARIMA Models in Forecasting Monthly Average Surface Temperature of Brong Ahafo Region of Ghana,» *International Journal of Statistics and Applications,* pp. 237-246, 2015.

[12] R. J. Hyndman y G. Athanasopoulos, Forecasting: Principles and Practice, 2nd ed., Melbourne, 2018.

[13] D. Abugaber, «Chapter 23: Using ARIMA for Time Series Analysis,» [En línea]. Available: https://ademos.people.uic.edu/Chapter23.html.

[14] A. Zajic, «Introduction to AIC — Akaike Information Criterion,» 27 Diciembre 2019. [En línea]. Available: https://towardsdatascience.com/introduction-to-aic-akaike-information-criterion-9c9ba1c96ced.

[15] J. &. P. A. &. S. A. &. C. B. Montaño, «Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy,» *Psicothema,* pp. 500-506, 2013.

[16] Google, «Infomes de mobilidad local sobre el COVID-19,» 2020. [En línea]. Available: https://www.google.com/covid19/mobility/.

WPA- Achievements of an international alliance in the midst of a pandemic

WPA - Logros de una alianza internacional en medio de una pandemia

Aris Castillo
Dirección de Relaciones Internacionales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ORCID

Guadalupe González
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro Regional de Chiriquí
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ORCID

José Calvo
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro Regional de Chiriquí
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ORCID

Horacio Fernández
Instituto de Plasma e Fusao Nuclear
Instituto Técnico de Lisboa
Lisboa, Portugal
ORCID

Elida de Obalía
line 2: *Lab. Pierre Marie Curie,*
Facultad de Ciencias y Tecnología.
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ORCID

***Abstract*—This article presents the results of the Massive Open Online Course (MOOC) in Experimental Physics produced by the Technical Institute of Lisbon and offered by the Universidad Tecnológica de Panamá within the framework of the World Pendulum Consortium. Among the innovations of this MOOC are the use of a remote pendulum network and peer evaluation. The implementation of the MOOC is positive, as long as there is an element of accountability, and the teacher is involved in the MOOC. The success rate of Experimental Physics MOOCs in Spanish is greater than 50%, which represents a much higher result than the 10% success rate reported in the literature.**

Keywords— Experimental physics, remote laboratories, pendulum network, MOOC, Open Massive Online Courses

***Resumen* — : Este artículo presenta los resultados del Curso Masivo Abierto en Línea (MOOC por sus siglas en inglés) de Física Experimental producido por el Instituto Técnico de Lisboa y que ofreció la Universidad Tecnológica de Panamá en el marco del Consorcio de Péndulo Mundiales. Entre las innovaciones de este MOOC están el uso de una red de péndulos remotos y la evaluación por pares. La implementación del MOOC es positiva, siempre y cuando exista el elemento de rendición de cuentas y el profesor esté involucrado en el MOOC. La tasa de éxito de los MOOCs de Física Experimental en español es mayor del 50%, lo que representa un resultado mucho mayor de la tasa de éxito, del 10%, reportada en la literatura..**

Palabras claves — Física experimental, laboratorios remotos, red de péndulos, MOOC, Cursos Masivos en Línea.

I. Introducción

El proyecto Alianza Mundial de Péndulos (WPA por sus siglas en inglés) (World Pendulum Alliance, 2020) inició en febrero 2019 [1] y está financiado por la Comisión Europea, a través de su programa Erasmus+ de generación de capacidades, siendo uno de sus objetivos fortalecer la enseñanza de las ciencias, física y matemáticas, a través del uso de laboratorios de experimentación remota con la implementación de herramientas digitales y tecnologías de información y comunicación (ICT). El WPA cuenta con miembros de la unión europea (Portugal, España, La Rep. Checa, Francia) así como miembros latinoamericanos (Panamá, Colombia, Brasil y Chile). La propuesta plantea específicamente el fortalecimiento de las ciencias físicas por medio de (1) habilitación de péndulos remotos conectados a una red mundial para experimentos remotos (2) la formación de centros de diseminación de ciencias, con infraestructura física (alojamiento del péndulo físico) y virtual, (3) el desarrollo de un Curso Masivo Abierto en Línea (MOOC por sus siglas en inglés) de física experimental en español y liderado por profesores colaboradores de Latinoamérica y (4) brindando capacitaciones a tanto a profesores en temas de enseñanza de la física, utilizando la física del péndulo como punto de partida, así como inducción a TIC de cómo implementar y manejar un péndulo remoto.

Es así, como en marzo del 2020, la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) inauguró su Centro de Diseminación de Ciencias [2] con un péndulo interconectado en la red de péndulos del consorcio; y como parte de las acciones de generación de capacidades, profesores del Instituto Técnico de Lisboa, de la Universidad de Barcelona, España y de la Universidad Técnica de República Checa en Praga ofrecieron un taller sobre el uso de la red de péndulos. En el entrenamiento participaron profesores de distintas regiones del país y de varias áreas de conocimiento, entre ellas física, computación, eléctrica y electrónica.

Esta colaboración internacional ofrece un espacio para que los miembros del consorcio puedan compartir conocimientos técnicos, didácticos y pedagógicos para resolver situaciones de interés común en la enseñanza de las ciencias, así como desarrollar habilidades en la comunidad académica y estudiantil.

En julio 2020, la UTP realizó un webinar sobre el uso de los péndulos remotos con la intención de divulgar esta herramienta educativa disponible para la comunidad

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00050

académica y estudiantil a nivel nacional [3], [4](Prensa-UTP), especialmente en un periodo en el cual las circunstancias a nivel mundial obligan al confinamiento, así como a la educación remota, a través de plataformas tecnológicas digitales. Si bien, a la fecha de esta publicación, es temprano para medir el impacto, podemos constatar el alcance de estas actividades, a través de más de mil visualizaciones.

Los MOOCs han alcanzado importancia por el impacto ya que ofrece una educación gratuita, al alcance de cualquier persona con acceso al internet y con contenidos basados en cursos universitarios de alto impacto, especialmente en ciencias y tecnología de universidades prestigiosas. [5]. Sin embargo, de acuerdo con Khalil et al [6], la tasa de éxito de los MOOCs es menor del 10%. Este estudio está basado en casi 50 MOOCs ofrecidos por las prestigiosas instituciones de Stanford (Coursera) y Harvard (EdX) y de las plataformas MOODLE y Udacity, sumando más de 2.5 Millones de estudiantes. Estas estadísticas son corroboradas por Vilkova et al. [7], quienes sugieren una taza de éxito del 2 al 10% debido a varios factores de los que resalta el aprendizaje propio.

La Universidad Politécnica de Valencia, España, ha desarrollado una experiencia similar a través de la creación de MOOCs relacionados con contenidos de física con el fin de nivelar estudiantes con distintos conocimientos al ingresar a la universidad [8]. La experiencia de UPV como medio de proveer un apoyo a estudiantes de cualquier parte del mundo en sus programas académicos ha logrado los resultados esperados, sin embargo, la tasa de éxito fue del 12%.

El éxito de las herramientas tecnológicas como el MOOC está basado en un alto grado de auto-disciplina, la cual se puede subdividir en 6 pilares: estructuración del entorno; el establecimiento de metas; gestión del tiempo; búsqueda de ayuda; estrategias de tarea; y autoevaluación. [9]. Para el MOOC de Física Experimental en español, el contenido está establecido a priori, lo que define las metas y los objetivos del curso.

Este artículo está enfocado en la experiencia de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y su rol con el MOOC de física experimental como parte de los resultados de esta colaboración internacional. [10][11]

II. Metodología

El proyecto se basó en el MOOC de Física Experimental, ofrecido por el Instituto Técnico de Lisboa (ITL, 2019; Ana Moura Santos & Viana, 2016). La primera actividad desarrollada fue lanzar el MOOC de Física Experimental sólo para profesores inscritos en el consorcio en mayo del 2020, con la idea de probar el rol de estudiante, sugerir ajustes y mejoras antes de lanzar el MOOC para estudiantes en los distintos países. Entre las sugerencias que se plantearon, además de las mejoras de las traducciones, fue desarrollar dos versiones, una en español y otra en portugués.

Posteriormente, se lanzó la primera versión para estudiantes en octubre del 2020 y otra versión en abril del 2021. El MOOC se desarrolla, dentro de la Universidad Tecnológica de Panamá, como una actividad dentro del curso de física, por lo cual el estudiante debe completar las asignaciones dentro de los tiempos estipulados. En cada ejecución del MOOC, se crean grupos distintos por cada profesor para facilitar el seguimiento y éxito de sus estudiantes. Al iniciar el MOOC, los profesores reciben un cronograma con las fechas de entrega de las asignaciones, las cuales son las mismas para todos los grupos creados. Sólo los estudiantes que alcanzan un 60% de la evaluación, pasan el MOOC. Al finalizar el MOOC el estudiante completa un cuestionario sobre su experiencia

A. MOOC de Física Experimental – Versión ESPAÑOL

El MOOC-ES de física experimental ofrecido está divididos en 3 secciones:

1. Introducción y presentación del proyecto del péndulo casero.

2. Marco teórico donde se presentan los conceptos de la física experimental, estadística descriptiva, cifras significativas, propagación de errores.

3. La física del péndulo, reporte del péndulo casero y revisión por pares, laboratorio remoto, herramientas para el ajuste de los datos experimentales..

A pesar de que las lecturas y videos pueden ser llevados al ritmo de cada estudiante, los tiempos para la elaboración del reporte del péndulo tiene que coincidir, de tal forma que se pueda ejecutar la revisión por pares. Es por eso que el MOOC no puede estar permanente disponible y tiene que tener fechas de entrega límite. Usualmente, se asignan 3 semanas para los módulos 1 y 2 (una semana sirve de comodín para que nuevos estudiantes se puedan incorporar), y 3 semanas para el módulo 3 que es el más complejo. Se espera que el estudiante dedique alrededor de 2 a 4 horas semanales para completar el curso. El MOOC tiene dos elementos innovadores en la enseñanza, uno es el uso de los laboratorios remotos, utilizando la red de péndulos, y el otro es el concepto de revisión por pares, donde parte de la calificación total es la revisión del reporte del péndulo casero, en el cual los estudiantes demuestran destrezas de mediciones precisas, uso correcto de cifras significativas, y propagación de los errores. Otra herramienta que tiene el MOOC es el Foro de discusión, donde los estudiantes y los asesores pueden hacer preguntas y contar con respuestas en un periodo razonable

B. Requisitos para la certificación del curso

Se requiere un puntaje de 60% para recibir un certificado de culminación satisfactoria del curso. El puntaje está dividido de la siguiente manera:

TABLE I. - Rubros de Evaluación del MOOC - Física Experimental

	Rubro de Evaluación del MOOC		
	Descripción	***Porcentaje***	***Modulo***
1	Marco Teórico –	30 %	2
2	Reporte de péndulo casero y revisión por pares	35%	3
3	Laboratorio remoto y física del péndulo	35%	3
	Total	**100%**	

Para llevar un control de la eficiencia del MOOC-ES, parte del curso cuenta con una encuesta general. Además, se aplicó una encuesta más detallada a los estudiantes de la UTP. Esta última encuesta se realizó por medio de Google Forms.

Hasta la fecha se han ofrecido dos cursos para estudiantes del MOOC en español una en octubre del 2020 (ITL, 2020) y otra en abril del 2021 (ITL, 2021) correspondiente al segundo semestre y al primer semestre del año escolar respectivamente..

III. 3. Resultados y Discusión

El MOOC de Física Experimental en español (MOOC-1) del 4 de octubre al 16 de noviembre de 2020 (ITL, 2020) se desarrolló, con la participación de estudiantes y profesores de Panamá, Colombia y Chile. En este MOOC participaron un total de 365 estudiantes y 24 profesores. De estos éstos 236 consiguieron culminar el MOOC y recibieron un certificado, y 159 de ellos pasaron con puntajes mayores a 80%. Este porcentaje de más de 60% de éxito, fuera de lo común, según la literatura, se debe a la interacción del profesor y el estudiante y a la rendición de cuentas de los estudiantes, ya que es un elemento evaluado en su curso regular.

A. Participación en el MOOC

En el MOOC de Física Experimental en español (MOOC-2) del 20 de abril al 31 de mayo de 2021 [11] participaron 391 estudiantes de Panamá, Colombia y Nicaragua acompañados de 17 profesores. De éstos, 173 consiguieron culminarlo, 112 con puntajes altos. Cabe destacar que al MOOC se inscribieron también estudiantes de educación media, lo cual pudo incidir en un menor porcentaje de estudiantes que lo completaron exitosamente, 44%, en comparación con el 65% de la primera versión.

TABLE II. - Participación estudiantil en el MOOC por País

	Participación en el MOOC-ES		
	País del participante	***MOOC-1***	***MOOC-2***
1	Panamá	280	270
2	Colombia	48	71
3	Nicargua	0	18
4	Chile	2	1
5	No identificado	59	31
	Total	**389**	**391**

Tal como fue mencionado antes, en cada ejecución del MOOC se forman cohortes de tal forma que los profesores pueden modificar el contenido de acuerdo con las necesidades sus clases y darles seguimiento a los estudiantes de una forma más individualizada. Por ejemplo, los tutores o profesores pueden habilitar o no tareas dentro del MOOC, o sugerir material adicional, así como mantener comunicación directa con su propio grupo.

El MOOC cuenta con una jerarquía administrativa donde el profesor principal tiene acceso abierto a modificaciones en el material del MOOC y a la administración de los miembros, a los tutores o profesores quienes tienen acceso a los miembros de su cohorte, así como a la participación en el Foro y los estudiantes miembros de una cohorte pueden comunicarse entre sí. Esto facilita la incorporación del MOOC como parte de la materia de Física I, o como el primer laboratorio de física experimental. Los resultados muestran que aquellos profesores que incorporaron el MOOC dentro de la evaluación del curso regular, sus estudiantes consiguieron completar el MOOC con éxito.

La innovación de esta experiencia es ofrecer al estudiante un mecanismo de apoyo para desarrollar habilidades y disciplina de estudio. A diferencia de los MOOCs convencionales en los cuales el estudiante dirige su ritmo de estudio y conclusión de asignaciones [7], el MOOC de física experimental desarrollado por nuestro equipo, se da en paralelo, mientras el estudiante está recibiendo el curso de física con su profesor, en el cual hay sesiones sincrónicas y seguimiento en tiempo real.

Por otro lado, un resultado a destacar fue el poco uso que los estudiantes le dieron a la herramienta del Foro de Discusión. Esto se debe a que el MOOC se da durante el desarrollo de la asignatura regular de física en la cual hay sesiones sincrónicas cada semana a través de otras plataformas. Adicionalmente, los estudiantes tienen acceso a otras herramientas de comunicación en tiempo real.

B. Distribución de calificación final

La gráfica de la Figura 1 muestra la distribución de las calificaciones del MOOC 1 y MOOC 2.

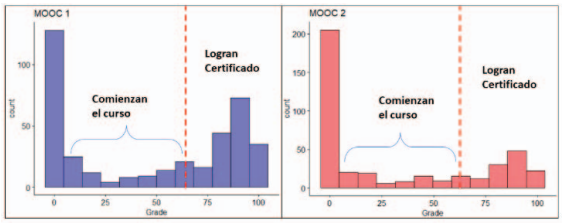


Fig. 1. - Distribución de la nota final del Mooc1 y Mooc2

Como se puede apreciar, hay un grupo significativo que se inscribió en el curso y nunca lo comenzó. Esto puede ser el resultado de (1) la dificultad en la inscripción de los estudiantes ó (2) el hecho de que estos estudiantes no tenían que rendir cuentas a sus profesores. En el primer punto, los profesores de la cohorte le proporcionaban al administrador los correos electrónicos de los estudiantes. Estos se inscribían en el curso, y los estudiantes podían verificarse siguiendo el enlace. De esa forma quedan registrados en el curso. Aunque recibían correo electrónico de los organizadores o tutores, nunca se conectaron al curso por falta de interés o por falta de conocimiento de cómo entrar en el curso. En el caso 2, si los profesores asesores no asignan una calificación que va a tener consecuencias en su promedio de pregrado, al menos que de que sea un estudiante muy motivado, no va a completar el curso. Los estudiantes que comienzan el curso, pero no lo terminan, pueden haber comenzado con entusiasmo, pero por no ser una nota que cuente, el curso baja de prioridad en el transcurso del semestre. En el caso del MOOC2, muchos de los estudiantes de Nicaragua no supieron acceder al curso. Esto se puede sanear teniendo talleres, documentación o YouTube que expliquen como conectarse al curso y ver las fechas de entrega de los proyectos.

C. Caso UTP Panamá

En esta sección presentamos cómo el MOOC de Física Experimental fue llevado en la UTP, desde la perspectiva de los estudiantes, las principales dificultades y resultados obtenidos. Primeramente, es interesante plantear que se realizaron actividades de difusión del proyecto y capacitaciones para involucrar profesores a nivel nacional, con lo cual se logró que 23 profesores de los pares latinoamericanos participaran en la capacitación de febrero

2020 realizada presencialmente en Panamá y presentada por los pares europeos. También se habilitó el MOOC para que los profesores participaran como estudiantes y staff como práctica para mejor adaptar el MOOC a las necesidades de la región, incluyendo la traducción al español. De los 7 profesores que participaron en el MOOC-1 4 habían participado en el MOOC y para los otros 3 era la primera vez que conocían sobre este MOOC-1.

Estos 7 profesores involucraron a 253 estudiantes, previamente registrados en sus cursos, de 16 semanas, de las cuales el MOOC de 5 semanas, representó la parte experimental, la cual normalmente se haría en laboratorios presenciales. Es decir, era imprescindible que los profesores hicieran algunos ajustes a las actividades, cronograma y metodologías que normalmente tendrían en su curso. Sin embargo, era evidente que la pandemia, lo ameritaba, aún sin participar en el MOOC. Para ellos, el MOOC fue la oportunidad de ofrecer el componente práctico del curso regular, dadas las limitaciones de movilidad y acceso al campus universitario, que impedían acceder físicamente a laboratorios.

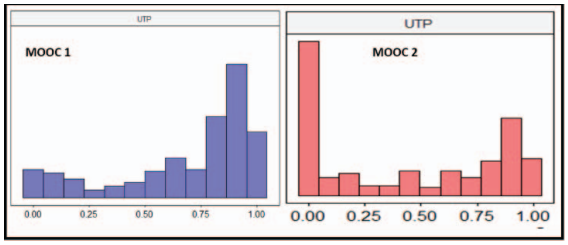


Fig. 2. - Resultados de la distribución de notas finales del MOOC 1 y MOOC para estudiantes de la UA

Como se puede apreciar en la Figura 2, en el MOOC-1 los estudiantes de la UTP adquirieron en promedio mejores calificaciones, lo que indica que respondieron de forma positiva a las direcciones de los profesores. En el MOOC-2 el alto porcentaje de estudiantes de la UTP que no participaron en el MOOC va de la mano de la importancia que los profesores le dan al MOOC. Esto se confirmó con entrevistas informales a los profesores participantes. Por otro lado, tal como lo describe Torres-Payoma et al. [12], el MOOC contempla una serie de contenidos, que no necesariamente van de la mano con los temas tratados en cada país. En el caso de la UA, el MOOC-2 se dio en el periodo del Primer Semestre del 2021 que corresponde a la materia de Física 2, en la cual hay menos contenidos relacionados y por lo tanto los profesores no le dan suficiente importancia. En el futuro es importante que los profesores se capaciten en el MOOC con anticipación para que puedan apoyar a los estudiantes.

D. Experimentos del MOOC

Uno de los aspectos innovadores del MOOC de Física Experimental, fue el uso de laboratorios remotos de la Red de Péndulos Mundiales que se pueden apreciar en la Figura 3a.

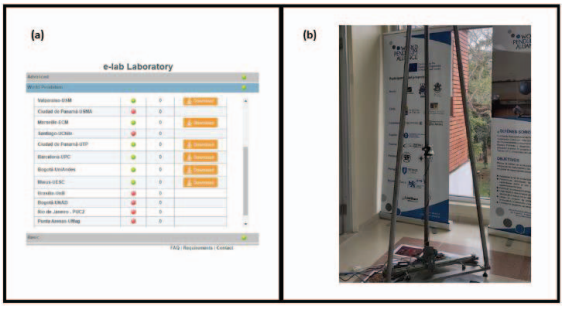


Fig. 3. -(a) Acceso a la red de Péndulos mundiales. (b) Péndulo primario en la Sede de la UA

Existen 13 péndulos primarios, uno por institución, en 8 países, y por cada péndulo primario, hay de 10 a 11 péndulos secundarios, que estarán accesible en el la WEB en un futuro cercano. Varios de los ejercicios del MOOC utilizan la data real de los péndulos remotos. Todos los péndulos tienen especificaciones similares, como el peso de la esfera (2 Kg +/- 75 gr), el diámetro de la esfera (80 mm +/- 1.5 mm), el tipo de cuerda (Remanium y acero inoxidable) de 0.4 mm con una elasticidad de ~ 200 GPa y coeficiente térmico de ~ 14 x 106 K-1. La longitud de la cuerda varía entre péndulos, pero se requiere una longitud mínima de 1.5 m. para que el sistema de mediciones funcione correctamente. La mayoría de los péndulos tiene una longitud de ~ 3 m, pero están medidos con una precisión de 1 mm. La Figura 3(b) muestra el péndulo primario en la Sede central de la UTP que tiene una longitud de 2.82 m. El cristal que se utiliza en el microprocesador debe ser de 30 ppm con un láser y un fotodiodo integrado. (Técnico_Lisboa, 2021). Este grado de precisión permite que los estudiantes tengan datos reales y pueden hacer comparaciones entre las diferentes latitudes. La aplicación permite que los estudiantes monitoreen en vivo la data obtenida y ésta a su vez puede ser bajada y analizada localmente.

Otra experiencia experimental que los estudiantes realizaron fue la elaboración de un péndulo casero, cuya data fue utilizada para determinar la constante de la gravedad, y el error propagado en la medición. Este reporte fue sometido a la evaluación por pares entre otros estudiantes del MOOC utilizando una rúbrica predeterminada de evaluación. Los estudiantes tuvieron la oportunidad de comentar su experiencia como evaluadores y como personas evaluadas por sus pares. Cabe señalar que la experiencia fue en general positiva y los estudiantes encontraron que las evaluaciones y los comentarios fueron justos y constructivos independiente de la nota final. Cabe señalar que las evaluaciones por pares se llevaron a cabo de forma anónima donde en el reporte del péndulo casero se excluía el nombre y la afiliación del estudiante

E. Resultados de la encuesta MOOC 1

La encuesta final aplicada después de la culminación del MOOC-1 fue respondida por 208 estudiantes, de estos todos terminaron el curso y más del 80% recibieron su certificado de culminación. En los tiempos de pandemia, queríamos saber qué tipo de dispositivo utilizaron los estudiantes para ejecutar el MOOC. La Figura 4 muestra que el 95 % utilizaba una computadora de escritorio o portátil para acceder al MOOC. En esta encuesta las respuestas no eran exclusivas, y el 34% también utilizaron su teléfono inteligente para acceder el MOOC. El hecho de la mayoría de los estudiantes estuvo

sentado en frente de una computadora o laptop puede sugerir el compromiso en la participación del MOOC. La estructuración del entorno es un factor importante en el éxito del MOOC. (Barnard et al., 2009)

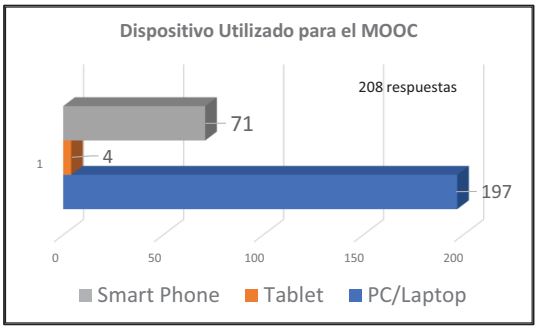


Fig. 4. - Dispositivos utilizados por los estudiantes

Uno de los datos más importantes fue la percepción de la dedicación por semana a cada una de las actividades. Los cuestionarios fue la actividad a la que dedicaron más tiempo, en promedio. Y el foro a la que menos tiempo dedicaron. En promedio, de acuerdo con esta encuesta, los participantes dedicaron de 1 a 2 horas por semana al MOOC. Esto se puede apreciar en la Figura 5. Lamentablemente no se tiene la información de cuánto tiempo cada estudiante estuvo conectado a MOOC para poder correlacionar

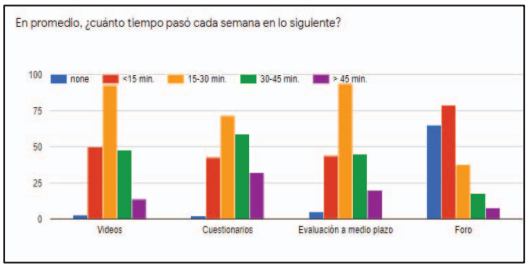


Fig. 5. - Resultados de los tiempos dedicados a las actividades del MOOC semanalmente

Uno de los pilares de la enseñanza a través de MOOCs es la administración del tiempo del estudiante. Los resultados de las encuestas muestran que los estudiantes dedicaron en promedio un tiempo significativo al MOOC, lo cual demuestra la alta tasa de éxito lograda. Un segundo pilar relacionado con los MOOCs es la capacidad del estudiante de buscar ayuda. En este sentido, como hemos mencionado antes, en este modelo de MOOC, el estudiante cuenta con el apoyo de su profesor, ya que el MOOC se da durante el desarrollo de la materia de Física regular. Los resultados más favorables se dieron en aquellos estudiantes donde el profesor consideró el MOOC como una parte de la evaluación de la materia. La existencia de Cohorte de los estudiantes representa otro apoyo ya que se pueden ayudar entre sí.

Un tercer elemento de la enseñanza con MOOC es la autoevaluación. Si bien, este MOOC no cuenta con autoevaluación, sí cuenta con la evaluación por pares, en la cual los estudiantes evalúan a cierto número de otros estudiantes. Este elemento resultó ser muy bien recibido por los estudiantes, tanto por la oportunidad de evaluar el trabajo de otros colegas, como por las evaluaciones y comentarios recibidos por su propio trabajo. Según sus comentarios, los estudiantes tienen a ser más honesto cuando evalúan o son evaluados por sus pares.

El 88% de los participantes de la encuesta recomendarían el curso mientras que el 11% no lo recomendarían. Cabe destacar que existe una correlación entre los participantes que recibieron el certificado y recomiendan el curso y aquellos que no recibieron el certificado y no recomiendan el curso

IV. Conclusiones

El MOOC de Física Experimental es una herramienta efectiva para implementar de manera sistemática en la UA que cubre los laboratorios de mediciones y propagación de errores, así como la innovación del acceso remoto a la red de péndulos. Les ofrece a los estudiantes la novedad del control remoto de instrumentos, así como la revisión por pares. Los estudiantes que terminan el curso y alcanzan el certificado de culminación del Instituto Técnico de Lisboa, se sienten satisfechos con el curso y están dispuestos a recomendarlo.

Los resultados demuestran que el éxito en la culminación del MOOC va de la mano con el nivel de involucramiento del profesor y cómo éste incluye el MOOC en la evaluación de la asignatura. Es importante que los profesores se involucren, le den seguimiento e incentiven a los estudiantes a terminar el MOOC como parte de la asignatura o crédito extra. Sin este incentivo, los estudiantes tienden a no terminar las asignaciones requeridas para completar con éxito el MOOC. Lograr un porcentaje tan alto de 60% de estudiantes que completan el MOOC de forma satisfactoria se debe a la innovación que plantea esta experiencia. Durante la ejecución del MOOC, el profesor está dando seguimiento al estudiante y además se mantienen las sesiones sincrónicas con ellos. La ayuda externa es uno de los aspectos importantes en la creación del MOOC. (Littlejohn & Milligan, 2015).

Para los profesores administradores, la experiencia de administrar el MOOC, las cohortes y las encuestas finales resultaron ser un mecanismo importante para impactar sus propios cursos. Estas herramientas resultan más relevantes si la materia se ofrece de forma virtual. Se podría argumentar que esta metodología esta más cercana a lo que se conoce como Pequeños Curso en Línea (SOOC por sus siglas en inglés). (Global, 2016). En este sentido, es importante que la universidad ofrezca oportunidades para alojar y desarrollar cursos como éste.

AGradecimeintos

Se agradece a los profesores de la Universidad Tecnológica de Panamá involucrados y al personal de la Dirección de Relaciones Internacionales por su apoyo a este proyecto. Este trabajo es financiado por el programa Erasmus+ CBHE de la Unión Europea. También, se ha recibido apoyo de la SENACYT bajo el programa del Sistema Nacional de Investigación otorgado a E.deO.. This paper is supported by the Erasmus+ programme of the European Union under grant agreement No 2018-3055, project World Pendulum Alliance.

References

[1] Prensa-UTP, “Lanzamiento de Proyecto Internacional Alianza de Péndulo Mundial,” *UTP Ridda 2*, 2019. https://utp.ac.pa/lanzamiento-de-proyecto-internacional-alianza-de-pendulo-mundial.

[2] Prensa-UTP, “UTP inaugura Centro de Diseminación de Ciencias de Laboratorio de Péndulos,” 2020. https://utp.ac.pa/utp-inaugura-centro-

de-diseminacion-de-ciencias-de-laboratorio-de-pendulos.

[3] Prensa-UTP, “Webinar: ‘Física experimental a través de Red de Péndulos: WPA – UTP,’” 2020. .

[4] RIDDA-2, “Fisica Experimental a través de Red de Péndulos: WPA-UTP.” 2020, [Online]. Available: https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/11473.

[5] N. Global, “Metodología de enseñanza y para el aprendizaje para cursos MOOC,” p. 32, 2016, [Online]. Available: https://www.nebrija.com/nebrija-global-campus/pdf/metodologia-MOOC.pdf.

[6] H. Khalil and M. Ebner, “MOOCs Completion Rates and Possible Methods to Improve Retention - A Literature Review,” *EdMedia World Conf. Educ. Media Technol.*, vol. 2014, no. 1, pp. 1305–1313, 2014, [Online]. Available: /p/147656/.

[7] K. Vilkova and I. Shcheglova, “Deconstructing self-regulated learning in MOOCs: In search of help-seeking mechanisms,” *Educ. Inf. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 17–33, 2021, doi: 10.1007/s10639-020-10244-x.

[8] P. Candelas Valiente, M. H. Gimenez Valentin, M. Hernández-Fenollosa, C. Rubio Michavila, J. Cerdá Boluda, and J. L. Busquets Mataix, “La herramienta MOOC como curso de nivelación en Física para estudiantes universitarios de Ciencias,” in *Jornada de innovación Educativa y de Docencia en la Universidad Politécnica de Valencia*, 2014.

[9] L. Barnard, W. Y. Lan, Y. M. To, V. O. Paton, and S. L. Lai, “Measuring self-regulation in online and blended learning environments,” *Internet High. Educ.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1016/j.iheduc.2008.10.005.

[10] ITL, “Curso Experimental Fisica - Español,” 2020. https://courses.elearning.tecnico.ulisboa.pt/courses/course-v1:MOOCs+feX+2020_es/about.

[11] ITL, “Física Experimental ES,” 2021. https://courses.elearning.tecnico.ulisboa.pt/courses/course-v1:MOOCs+feX+2021_es/about.

[12] F. Torres-payoma, M. Escobar, L. Castro, K. Triana, and D. Herrera, “Use and Design of Virtual and Remote Free Access Experiments : World Pendulum Alliance and DLab in Times of COVID 19,” vol. 0836, pp. 0–2, 2021.

agile methodology

Desarrollo de proyectos de software en trabajos de grado utilizando una metodología ágil

Gustavo A. Rivera S.
Universidad Libre
Bogotá D.C., Colombia
gustavoa.riveras@unilibre.edu.co

Pedro A. Forero S.
Universidad Libre
Bogotá D.C., Colombia
pedroa.foreros@unilibre.edu.co

Fredys A. Simanca H.
Universidad Libre
Bogotá D.C., Colombia
fredysa.simancah@unilibre.edu.co

Fabian Blanco G.
Universidad Libre
Bogotá D.C., Colombia
fabian.blancog@unilibre.edu.co

***Abstract*—In spaces of degree work in higher education, the proposed software projects demand the use of so-called agile methodologies, which are based on the principles set forth in the Agile Manifesto and the disciplinary theoretical support of Software Engineering. Methodologies characterized by iterative and incremental development, supported by heuristics, of great acceptability in the dynamics of current software development due to efficient time management; when adopted in the degree works, where academic and administrative commitments of particular connotation are fulfilled, difficulties are evident in the methodological characterization, due to the business orientation precepts of universally recognized agile methodologies. In this sense, the MaTraGra methodology is conceived as a solution to this problem.**

***Keywords*—Software Engineering, MaTraGra, agile methodology, software project, degree work**

***Resumen*—En espacios de los trabajos de grado en educación superior, los proyectos de software planteados demandan, de la utilización de las denominadas metodologías ágiles, las cuales se sustentan en los principios expuestos en el Manifiesto Ágil y el apoyo teórico disciplinar de la Ingeniería de Software. Metodologías caracterizadas por el desarrollo iterativo e incremental, apoyadas en la heurística, de gran aceptabilidad en la dinámica del desarrollo de software actual por el eficiente manejo del tiempo; al ser adoptadas en los trabajos de grado, en donde se cumplen compromisos académicos y administrativos de connotación particular, se evidencian dificultades en la caracterización metodológica, por los preceptos de orientación empresarial de las metodologías ágiles de reconocimiento universal. En este sentido, la metodología MaTraGra es concebida como solución a esta problemática.**

***Palabras* claves—Ingeniería de Software, MaTraGra, metodología ágil, proyecto de software, trabajo de grado**

I. INTRODUCCIÓN

Los entes estatales orientadores del sector educativo, establecen criterios de construcción curricular acogidos por las Instituciones de Educación Superior -IES- que, dentro de la autonomía universitaria, reglamentan el trabajo de grado como componente final del plan de estudios para evidenciar las competencias de formación profesional integral, en cumplimiento de requisitos académicas y administrativos para culminar estudios.

Una modalidad del trabajo de grado inmerso en el plan de estudios de Ingeniería, es apropiada con el fin de solucionar problemas a través de proyectos de software; momento en el cual se plantea la utilización de una metodología para el desarrollo de software, dentro del abanico de metodologías pregonadas por la Ingeniería de Software -IS- y de aceptación en el ámbito empresarial global.

Respecto a los métodos o metodologías para el desarrollo de software sustentadas en la IS, son regularmente clasificadas en tres categorías: tradicionales, ágiles e híbridas. Las primeras, identificadas por la rigurosidad metódica, acudiendo a lineamientos secuenciales de cumplimiento de etapas acorde a una rigurosa planeación y orientación procedimental a los productos [1].

Las metodologías ágiles, se caracterizan por promover la flexibilidad procedimental; el desarrollo incremental e iterativo de productos; participación continua del cliente; etapas de desarrollo cortas; en general, se orientan a la heurística afianzada en el recurso humano. Éstas metodologías son de gran acogida y reconocimiento mundial para desarrollo de software [2]. Finalmente, las metodologías híbridas, permiten trabajar las prácticas de las dos corrientes metodológicas tradicional e híbrida.

En los proyectos de desarrollo de software adscritos a los trabajos de grado ingenieriles, los estudiantes adoptan metodologías ágiles consecuentes con su caracterización y de acogimiento universal, presentando inconvenientes al acoplar, ha espacios académicos, una metodología orientada a ambientes empresariales; específicamente, en el dilema de la designación de roles, gestión de recursos e incumplimiento de compromisos académicos, problemática evidenciada en la sustentación ingenieril del proyecto [3].

De la experiencia vivencial académica como jurado y director de trabajos de grado donde se suscriben proyectos para el desarrollo de sistemas de software, se evidenció la dificultad en sustentar la sistematicidad metódica práctica del uso preferente de las metodologías ágiles, problemática compartida en escenarios de orden nacional e internacional donde se acogió como ponencia la investigación proferida en sus etapas tempranas y finales.

Consecuente con lo anteriormente planteado, se propuso y se desarrolló la metodología ágil MaTraGra, resultado de una

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00051

investigación en formación doctoral, orientada al desarrollo de proyectos de software dentro de los trabajos de grado ingenieriles. Metodología que pregona como ventajas: flexibilidad, desarrollo incremental y procesos iterativos; estadios colaborativos de evaluación ingenieril; documentación concurrente; y asignación de roles acordes a ambientes académicos.

Este documento presenta, la fundamentación teórica y conceptual de las metodologías ágiles que apoyan la concepción de la metodología MáTraGra, componentes metódicos y estructurales, dinámica procedimental, enfoque de aplicación y la evaluación ingenieril de la metodología, aunada, con la experimentación de la metodología en estudio de caso en entornos académicos en educación superior y los resultados obtenidos.

II. PROYECTOS PARA EL DESARROLLO DE SOFTWARE EN TRABADOS DE GRADO

Para la gestión y desarrollo de proyectos de software, la IS cataloga tres aspectos fundamentales: el contexto para la gestión y control del proyecto; en segundo lugar, los métodos alineados al ciclo de vida del software; y finalmente, las técnicas y herramientas soportadas en las Tecnologías de Información -TI-, que aplican a los dos anteriores.

Las metodologías para el desarrollo de software representan una forma de proceder dentro de un contexto de aplicación, para dar cumplimiento a los objetivos planteados en un proyecto [4]. Para Tinoco, et al. [5], su evolución se da, de acuerdo con las expectativas y exigencias de las dinámicas evolutivas de las TI. Suelen clasificarse desde el ámbito ingenieril y su perspectiva de aplicación: en tradicionales, ágiles e híbridas.

Respecto a la necesidad, de que el ciclo de vida del software se soporte en modelos o metodologías, Bauer [6], lo justifica en relación con la rentabilidad y fiabilidad; Boehm [7], lo califica como una forma óptima de utilizar el conocimiento científico. Lo que sustenta que, los proyectos para el desarrollo de sistemas de software participan del ciclo de vida del software.

Una metodología ágil para el desarrollo de software, según Sommerville [8], se encuentra planteada a partir de modelos de sistemas, notaciones, reglas, sugerencias de diseño y guías de procesos, participando de un enfoque estructurado. Asimismo, debe responder a un contexto de aplicación desde la perspectiva de productividad y competitividad.

Al calificar las metodologías tradicionales, en ellas se identifican las siguientes características: el enfoque a los productos, control exhaustivo a los procesos, y composición en etapas o fases de cumplimiento en secuencia, como respuesta a una planeación compleja y estricta [9]; metodologías que han recibido críticas aduciendo la aplicabilidad utópica por usuarios hipotéticos [10].

Las metodologías ágiles se fundamentan en heurísticas expuesta por el recurso humano, agilidad asociada a los tiempos de respuesta, flexibilidad en los procesos y adaptabilidad a ambientes particulares [11]; propician la productividad del equipo de trabajo, la incorporación del cliente, sin hacer de la arquitectura del software un componente rígido; adheridas a los postulados del Manifiesto Ágil [12], de coautoría de Beck [13], constituido en el pilar histórico de mayor relevancia.

Según estudios [2], las razones para la mayor demanda de las metodologías ágiles son: la gestión a prioridades cambiantes, mejoramiento de tiempos de entrega de productos, productividad del equipo de trabajo, alineación con las TI y calidad de software. El abanico de metodologías ágiles abona el camino para su estudio y concepción, al respecto Hawrish [14], propone la selección de la metodología de acuerdo a la naturaleza del proyecto.

Las metodologías híbridas, acogen los mejores preceptos de las tradicionales y ágiles, incorporando cierto grado de flexibilidad en el proceso, atendiendo la disciplina de cumplimiento de planificación del trabajo en respuesta a limitantes externas de tiempo y recursos económicos [15]; adoptadas en consideración a sus bondades procedimentales o metódicas [16].

El trabajo de grado se plantea, como un componente terminal en los programas académicos de las IES, las cuales, haciendo uso de la autonomía universitaria proferida por el estado, establecen lineamientos reglamentarios abordados por los estudiantes en su aptitud discrecional. Trabajo de grado, entendido como una práctica académica integral para evidenciar y valorar las competencias profesionales disciplinares, referido por Torres [17], como el resultado de un proceso creativo e innovador, objetivo, reflexivo controlado y crítico.

Definido por Sáez [18], como Software Mental, el Enfoque Sistémico es direccionado a la identificación estructural del objeto de estudio, la calidad del diseño y la concepción de metodologías de sistemas; para Petrella [19], es referente en la construcción de modelos administrativos graduales y evolutivos. Asimismo, propone la dimensión sistémica para abordar problemáticas en espacios de tiempo definidos y proyectar soluciones.

III. METODOLOGÍA ÁGIL MATRAGRA

La metodología presentada, es consecuencia de mi tesis de doctorado, fundamentada en una investigación cualitativa experimental, como práctica de conocimiento para la reconstrucción de modelos [20]; mediante estudio de casos planteados por Stake [21]; orientados a la transformación de prácticas en escenarios educativos, apoyados en Sandín [22]; flexible, con la participación del investigador y perspectiva holística, según lo referido por Hernández, et al. [23]

Orientada al desarrollo de proyectos de software en el marco de trabajos de grado, justificada por la problemática advertida por los estudiantes, al asimilar metodologías ágiles de reconocimiento global perfiladas al mundo empresarial, que al ser aplicadas en espacios académicos, se participa de dificultades respecto a: espacios de trabajo y asesoramiento; adquisición y administración de recursos; y tiempos de cumplimiento; adheridos a la poca experticia de los estudiantes, en ejercicios profesionales de connotación evaluada.

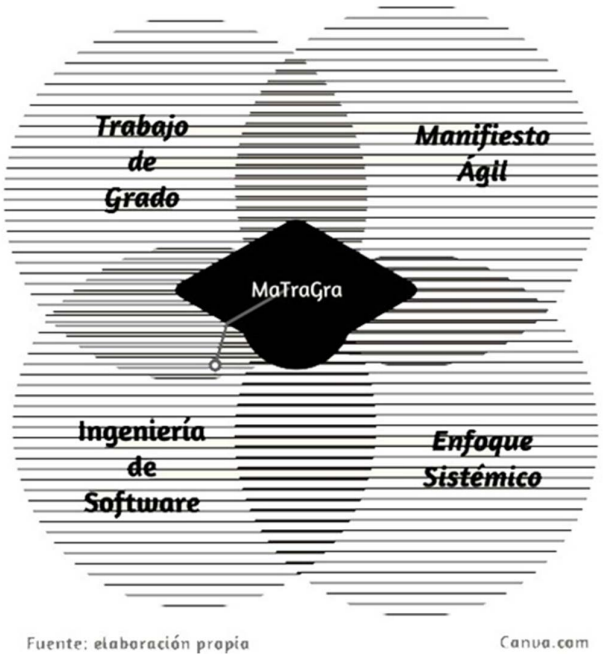


Figura 1. Referentes de MaTraGra.

Expuesto por Pressman, et al. [24], una metodología se concibe sustentada en dos categorías: el aspecto filosófico, en relación a la afinidad a las metodologías ágiles y, en segundo lugar, los lineamientos sobre el desarrollo de proyectos de software, enmarcados disciplinalmente por la IS respecto al cumplimiento en proponer procesos de análisis, diseño, comunicación continua y retroalimentada. En consecuencia, en la metodología MaTraGra confluyen cuatro saberes referenciales de apoyo conceptual -Figura 1-:

1) *Trabajo de grado*: determina el perfil de aplicación u orientación de la metodología.
2) *Manifiesto Ágil*: provee los principios constitutivos de las metodologías ágiles.
3) *Ingeniería de Software*: sustenta los componentes metódicos y metodológicos para abordar proyectos de software.
4) *Enfoque Sistémico*: representa el espectro integral contextual.

Referido por Avison, et al. [25], una metodología se constituye de procedimientos, técnicas, herramientas y documentos; se estructura mediante faces y sub-fases, abarcando la planificación, gestión, control y evaluación. Además, se encuentra dispuesta y organizada en etapas apropiadamente definidas [26]. A continuación, se presentan los componentes de la metodología MaTraGra.

Roles

El desarrollo ágil de software promueve el trabajo en equipo colaborativo [27], grupos de desarrollo pequeños y estables [8]; consecuente con lo citado, el recurso humano pregonado por la metodología proferida, se plantea acorde a las disposiciones de los trabajos de grado. En consecuencia, designa dos roles:

1) *Estudiante*: responde por el desarrollo del proyecto de software en cumplimiento de los compromisos adquiridos en el anteproyecto.
2) *Director*: cumple el rol de asesor y validador, certificando la calidad ingenieril del proceso y productos.

Documentación

Cobra relevancia para propósitos de revisión y corrección en el desarrollo del proyecto; se enfoca a facilitar la usabilidad de los productos [24]; y para el registro de actividades y administración de la agenda de compromisos [28]. En el desarrollo ágil de software por iteraciones o faces, los documentos formales contribuyen a procesos de comunicación en cumplimiento de requisitos [8]. Se disponen dos componentes de documentación concurrentes al desarrollo del trabajo de grado:

Registro de actividades: se constituye en agenda y registro de actividades y compromisos planificados por el director o tutor y los estudiantes. El director o tutor es garante de su integridad.

Documento ingenieril: fundamenta el soporte sustentable del ejercicio académico dentro del trabajo de grado, en observancia de los reglamentos o normas dispuestas por la institución educativa. Bajo la responsabilidad del estudiante y la validación del director o tutor.

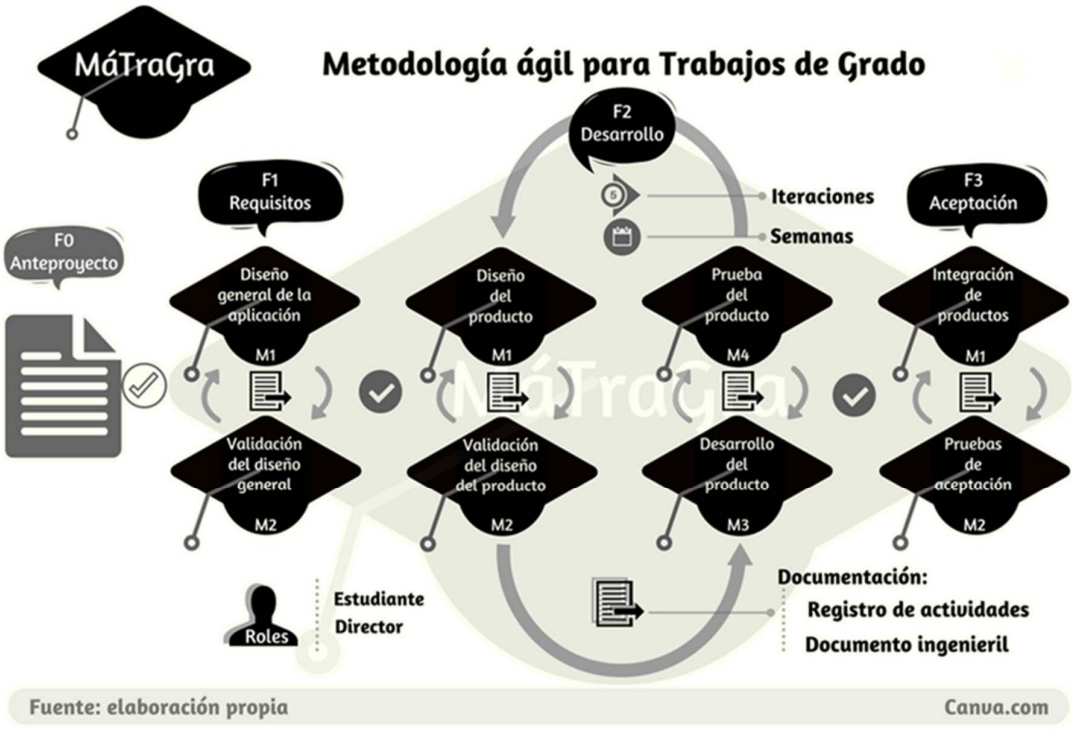


Figura 2. Metodología MaTraGra.

Estructura y procesos de MaTraGra

Dispone de fases supeditadas a la iteración, desarrollo incrementa y flexibilidad, determinadas por los momentos de validaciones -Figura 2-:

- *Fase 0, Anteproyecto*: donde se concibe el proyecto de acuerdo a la reglamentación institucional. Se constituye en prerrequisito fundamental para abordar el desarrollo de la metodología.
- *Fase 1, Requisitos*: propone la identificación de requisitos para determinar el comportamiento, propiedades y restricciones del software, direccionado implícitamente a la calidad. Conformado por dos momentos iterativos: diseño general de la aplicación y validación del diseño general.
- *Fase 2, Desarrollo*: participa del desarrollo iterativo e incremental de productos, contempla la flexibilidad respecto a la redefinición de requerimientos. Compuesta de cuatro momentos: diseño del producto, validación del diseño del producto, desarrollo del producto y prueba del producto.
- *Fase 3, Aceptación*: refiere a la validación para la consolidación integral del sistema de software y los soportes. Compuesta de dos momentos: integración de productos y pruebas de aceptación.

Para cualificar un desarrollo de software es pertinente orientarlo a las personas [20], en consecuencia, se proponen como estrategias metódicas las siguientes: trabajo colaborativo, asignación de responsabilidades, retroalimentación frecuente, documentación concurrente, bitácora de procesos y actividades, y pruebas programáticas. Adicionalmente, en apoyo al desarrollo sistemático, se presenta la aplicación TraGraapp, elaborada para plataformas de dispositivos móviles, con el fin de administrar los procesos y actividades inmersos en las fases y momentos.

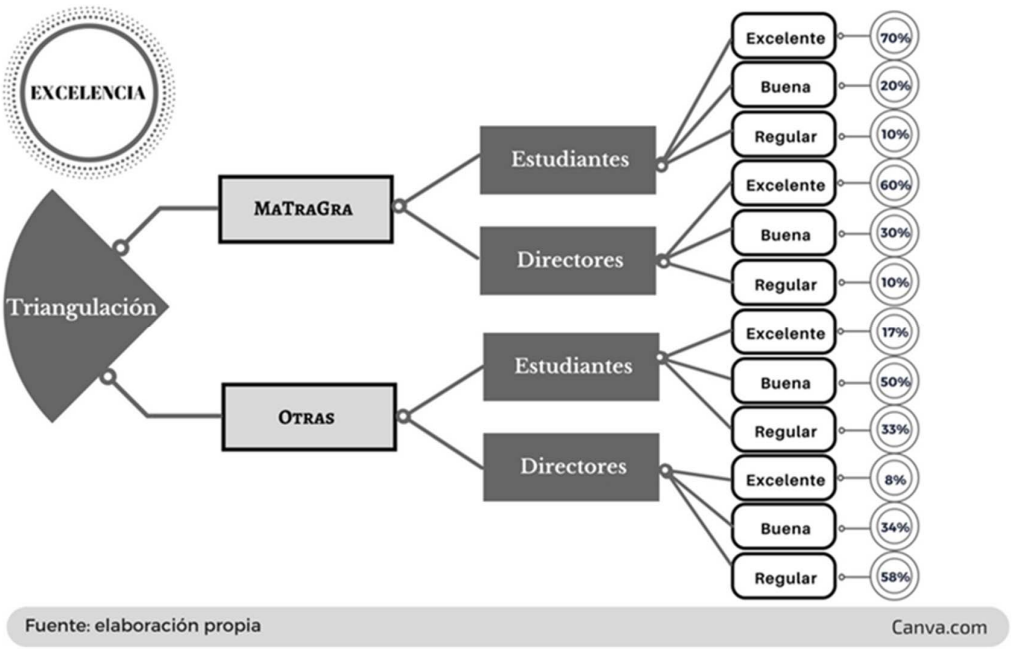


Figura 3. Evaluación de MaTraGra.

La metodología MaTraGra fue expuesta a la experimentación en estudio de casos, en el desarrollo de proyectos de software en el marco de trabajos de grado del programa académico de Ingeniería de Sistemas, al indagar sobre la percepción de su aplicación, los estudiantes y directores de los proyectos vinculados al estudio, calificaron positivamente la experiencia ingenieril de la metodología concebida, catalogándola en el orden de excelente, frente a la adopción de otras metodologías ágiles; valoración representada en la Figura 3; advirtiendo en ella una mayor adaptabilidad.

IV. CONCLUSIONES

La metodología ágil MaTraGra se propone, en su orientación, para ser seleccionada y abordada en el desarrollo de proyectos de sistemas de software propuestos en los trabajos de grado en ambientes académicos de IES, en donde se dificulta la aplicación de las metodologías ágiles de reconocimiento universal; participando del proceso de formación y sustentación de competencias profesional.

Son características relevantes de la metodología MaTraGra: flexibilidad metódica y desarrollo incremental de productos en procesos iterativos con ciclos cortos de trabajo, estadios de validación colaborativos que promueven la retroalimentación, equipos de trabajo pequeños y cohesionados, documentación concurrente, y participa del cumplimiento de las disposiciones normativas reglamentarias institucionales sobre trabajos de grado.

Consecuentes con el sometimiento de la metodología MaTraGra a herramientas de valoración de su agilidad, se puede conceptuar de manera concluyente, su afinidad con los principios pregonados en el Manifiesto Ágil y universalmente aceptados por la corriente del desarrollo ágil de sistemas de software.

Asimismo, la experimentación en espacios académicos a través de planteamientos de estudio de caso y apoyados en la percepción de los actores involucrados, se estableció la calificación de excelencia en la aplicabilidad metódica y alineación con la formación académica y la calidad de productos de software. Se relacionan como ventajas respecto a las metodologías ágiles de reconocimiento universal, los siguientes aspectos:

La adaptabilidad a espacios académicos, participando de la formación del profesional pregonado por los objetivos curriculares de los programas de educación superior.

Determinación y asignación de roles acordes a la disposición del recurso humano contemplado en los trabajos de grado.

Componentes procedimentales de flexibilidad relevante, bajo la perspectiva de aprendizaje colaborativo y refactorización del diseño ingenieril.

Espacios de valoración procedimental y de productos con fines de revisión crítica retroalimentada por el asesor o tutor.

Disposición a la utilización de artefactos direccionados a la gestión del proyecto y al cumplimiento de las normas institucionales; refiérase al registro de actividades y la documentación concurrente.

Complementando la percepción de la metodología por los actores de los casos de usos, mediante la aplicación de instrumentos validados para la investigación, adicionalmente, se puede acotar la apropiación de conocimientos y habilidades ingenieriles, relacionados con los proyectos de software, que sustentan la formación competente profesional integral, en cumplimiento de los objetivos curriculares adheridos a los trabajos de grado.

Acorde a la dinámica de las metodologías ágiles, se advierte la disposición evolutiva de la metodología presentada, hacia la gestión de proyectos, sin perder el perfil de adherencia metódica pregonada y apoyada por la IS, la orientación a espacios de formación académica, los preceptos de calidad adheridos al desarrollo de proyectos de sistemas de

software, siempre en procura del conocimiento en el campo de la TI al servicio sostenible de la humanidad.

REFERENCIAS

[1] E. Orejuela, T. Restrepo. D. Rojas y A. Abucha, "El traje nuevo del Emperador: la metodología de desarrollo SCRUM. ¿Por qué falla en proyectos de software?", Avenir, 2019.

[2] Digital.ai, "15th Annual State of Agile Report. Agile adoption accelerates across the Enterprise", https://digital.ai/resource-center/analyst-reports/state-of-agile-report, 2021.

[3] S. Chalela, G. Valencia y M. Cadavid, "Psycho-social and familial factors influencing drop-out rates among university students in the context of developing countries", Revista Lasallista de Investigacion, vol. 17, 2020.

[4] J. Candejas, "Implementación del Modelo Integral Colaborativo (MDSIC)", México: Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 2014.

[5] O. Tinoco, P. Rosales y J. Salas, "Criterio de selección de metodologías de desarrollo de software", España y Portugal: Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, 2010.

[6] L. Bauer, "Software Engineering, Information Processing", 71, Amsterdam: North Holland Publishing Co, 1972.

[7] B. Boehm, "Anchoring the Software Process", IEEE Software, vol. 13, núm. 4, http://sunset.usc.edu/publications/TECHRPTS/1995/uscse95-507/ASP.pdf, 1996.

[8] I. Sommerville, "Ingeniería del software", 9ª Edición, España: Pearson editores, 2011.

[9] H. Janampa, K. Sotomayor y M. Prad, "Extreme programming software development model on scrum for agile software management", Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao – RISTI, 2021.

[10] D. Truex, R. Baskerville y J.Travis, "Methodical systems development: The deferred meaning of system development methods", Accounting, Management and Information Technology, 2000.

[11] S. Tridibesh, "A Guide to the Scrum Body of Knowledge", Scrumstudy. Phoenix, Arizona, http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004, 2016.

[12] Manifiesto Ágil. "Manifiesto para el Desarrollo Ágil de Software", http://agilemanifesto.org/iso/es/manifesto.html, 2001.

[13] K. Beck, C. Andres, "Extreme Programming Explained: Embrace Change", 2ª Ed., Boston: Addison Wesley Professional, 2004.

[14] S. Hawrish, y J. Ruprecht, "Light Methodologies: It's like Déjà Vu All over again", Cutter IT Journal, 2002.

[15] D. Alves, E. Costa., E. Días y M. Ferreira, "Application of a hybrid process software requirements management", 11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Gran Canaria. (2016).

[16] Mikarimin, "Metodología Híbrida de Desarrollo de Software Combinando XP y Scrum", Revista Científica Multidisciplinaria, Universidad Regional Autónoma de los Andes UNIANDES - Sede Santo Domingo, 2019.

[17] L. Torres, "Tesis de Maestría. Qué Hacer", Bogotá: Universidad Autónoma de Colombia, 2013.

[18] F. Sáez, "Complejidad y Tecnologías de Información", Cuadernos de Tecnología y Sociedad n°3, Madrid: fundetel, http://dit.upm.es/~fsaez/intl/libro_complejidad.pdf, 2009.

[19] C. Petrella, "Aportes del Enfoque Sistémico a la Comprensión de la Realidad. Avances del proyecto de investigación", https://docplayer.es/18981114-Avances-del-proyecto-de-investigacion-aportes-del-enfoque-sistemico-a-la-comprension-de-la-realidad-v02.html, 2007.

[20] J. Martínez, "Métodos de investigación cualitativa", Bogotá – Colombia: Revista de la Corporación Internacional para el Desarrollo Educativo, Silogismo número 08, 2011.

[21] R. Stake, "Investigación con estudio de casos", Madrid: Morata, 2005.

[22] M. Sandín, "Investigación Cualitativa en Educación. Fundamentos y Tradiciones", Madrid: McGraw Hill, 2003.

[23] R. Hernández y L. Baptista, "Metodología de la Investigación", México: Mc Graw Hill, Sexta edición, 2014.

[24] S. Pressman y B. Maxim, "Software Engineering. A practitioner's approach", Eighth Edition, New York: McGraw Hill Education, 2015.

[25] E. Avison, y G. Fitzgerald, "Information system development. Maidenhead", Maidenhead: McGraw-Hill Education, 2006.

[26] V. Chandra, "Comparison between Various Software Development Methodologies. International Journal of Computer Applications", https://pdfs.semanticscholar.org/e237/f9cb136f494c2bd0ce91525808c5c968b6b4.pdf, 2015.

[27] A. Cockbun, "Agile Software Development", 2ª Edición, Madrid: Addison Wesley, 2007.

[28] M. Piattini, y F. García, I. García y F. Pino, "Calidad de Sistemas de Información", 3ª Edición ampliada y actualizada, Alfaomega, Ra-Ma, 2015.

The hidden physics behind a pendulum

Adding up physics studies on a pendulum remote experiment

Horacio Fernandes
Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Instituto Superior Tecnico,
Universidade Lisboa
Lisbon, Portugal
hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Filipe Dias
Centro Ciência Viva Algarve
Faro, Portugal
fdias@ccvalg.pt

Rafael Henriques
Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Instituto Superior Tecnico,
Universidade Lisboa
Lisbon, Portugal
rhenriques@ipfn.ist.utl.pt

Elida Obaldia
Universidade Tecnologica Panama
Panama City, Panama
elida.deobaldia@utp.ac.pa

Pedro Rossa
Instituto Superior Tecnico,
Universidade Lisboa
Lisbon, Portugal
pedro.rossa@tecnico.ulisboa.pt

Manuel B. Santos
Instituto Superior Tecnico,
Universidade Lisboa
Lisbon, Portugal
manuelbbsantos@tecnico.ulisboa.pt

***Abstract*—Pendulums are used everywhere as centerpieces for teaching mechanics. Effectively, pendulums have a richness covering from the simple mathematical pendulum's model to unique features only highlighted in experimentation. Such behaviors allow the study of additional mechanical phenomena and give the opportunity to validate distinct physical features of their dynamics. Conversely to simulations we bring up in this paper the evidence that only experimental apparatus can bring up some "hidden" physics on pendulums by comprehensively interpreting the experiential data from a remotely controlled laboratory. Actually, only by performing real experiments we can discover new phenomena in addition to the ones expected because basic approaches to physics can hide other unexpected behaviors. In this paper we will "discover" some hidden facts in a regular pendulum just by having a very precise timing system.**

Resumen—Los péndulos se utilizan en todas partes como pieza central para la enseñanza de la física mecánica. Efectivamente, los péndulos tienen una riqueza que abarca desde el simple modelo matemático del péndulo hasta características únicas que solo se destacan con la experimentación. Dichos comportamientos permiten el estudio de fenómenos mecánicos adicionales y brindan la oportunidad de validar distintas características físicas de su dinámica. A la inversa de las simulaciones, presentamos en este artículo la evidencia de que solo los aparatos experimentales pueden mostrar la física "oculta" en los péndulos mediante la interpretación integral de los datos experimentales de un laboratorio controlado de forma remota. En realidad, solo realizando experimentos reales podemos descubrir nuevos fenómenos además de los esperados, porque los enfoques básicos de la física pueden ocultar otros comportamientos inesperados. En este artículo vamos a "descubrir" algunos hechos ocultos en un péndulo regular con sólo tener un sistema de tiempo muy preciso.

Keywords — Educational technology, elab, inquiry learning spaces, local gravity, pendulum, torsion pendulum, remote controlled laboratory

I. World Pendulum Alliance

The World Pendulum Alliance[1] uses several pendulums distributed over several latitudes that can be seen as a global experimental device acting as a gravity mapper. The "world pendulum" [2] was initially devoted to the gravitational mapping on Earth, by spreading over several latitudes similar pendulums with a special design to encompass the necessary precision for the expected variation. Nevertheless it can be used as a "normal" single pendulum to pursue the usual physics studies such as the difference between the simple pendulum and the physical pendulum where moment of inertia has to be taken in consideration. Moreover if we take the world pendulum as a single experiment, in certain circumstances we can detect weird behaviour detected as a very small beating frequency as seen later.

The world pendulum was developed as one of the elab experiments [3] available in different categorized laboratories, following the same deployment strategy. It is hosted in several distributed physical laboratories and virtualized in a framework [4], the FREE platform.

The purpose of this article is to show the different levels at which we can dig into the physics presented by the remote pendulums, and the consequent didactic materials that can be extracted at the difference levels, some of them eventually hidden from a less attentive eye [5].

Although computer simulations can aid in the understanding of specific topics in physics, they always gave the same result in deterministic experiments. In contrast, real experiments not only have the richness of experimental uncertainties that are part of any manipulation of physical equipment we can't get rid of, but they also bring a pile-up of various secondary physical phenomena. Nevertheless, after observing such unexpected phenomena we can bring to the students the physic model that can answer to a consecutive deeper analysis on the data as we have the necessary accuracy available.

If we take the gravity measured in several places we can approach the harmonic description of Earth's gravity [12] as shown in figure 1. Here, readings from Punta Arenas to Prague are displayed (g_experimental) and plotted against theoretical values (g_calculated, g_wolfram[13]) in accordance to the geodesic modelling of the Earth:

The WP@ELAB aka WORLD PENDULUM ALLIANCE is funded by the Erasmus+ program from the EU under the grant agreement 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00052

$$g_n(\varphi) = 9.780326772 \times [1 + 0.00530233 \cdot sin^2(\varphi) - 0.00000589 \cdot sin^2(2\varphi)] \quad (sea\ level)$$

$$g_n(\varphi, h) = 9.780327 * \left(1 + 0.0053024 * \left(sin(\varphi * \pi/180)\right)^2 - 0.0000058 * \left(sin(\varphi * \pi/180)\right)^2\right) - 0.000003086 * h \quad (\text{w/ altitude correction})$$

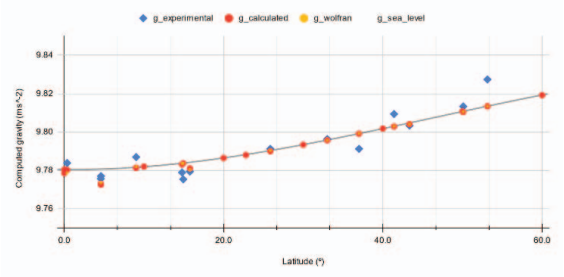


Fig. 1. Computed local gravity for some of the WPA hosts and comparison with the harmonic modeling (g_calculated) and considering the local city altitude from Wolfram alfa output; The curve represents the best fit extrapolation at sea level according to WPA data.

In this paper we introduce several unexpected behaviours in a "normal" pendulum starting from the (i) physics pendulum correction, (ii) the torsional movement and the (iii) high gain in precision by using differential readings and (iv) the error induced by the ambient temperature.

II. The Basic Pendulum

A. Hardware

The World Pendulum is based on a pendulum holed by a cable of Remanium, a low thermal expansion cable, with 400 um of section and approximately 3 m length. The bob is positioned accurately by an automated mechanism with a shovel driven by a step motor with a launching amplitude resolution of 1 mm. This allows to have a systematic way to execute the experiment without any human intervention that could induce recursive random errors. By using this mechanism any systematic error is cancelled easily by differential readings. Taking the usual readings of the pendulum's period we can detect the local gravity down to 10^{-4} precision. As such, correction due to inertia is needed by adding the physical first order term as it accounts for 0.1%.

As a matter of fact, this correction can be normally neglected and do not impact on the latitude comparison as it can be seen as a systematic drift, creating an offset on the reading but not distorting the perception of its behaviour.

B. Output

The experiments returns the time of each full period collected at the origin (approximately the bob rest position – vertical position), which is computed from two consecutive trailing edges from the photogate occlusion. For very small oscillations only one count is taken if the bob does not cross entirely the photogate. As can be seen from figure 2, raw data presents small fluctuations in the readings. These fluctuations could be interpreted as noise but a closer view identifies a clear periodic motion.

To improve the accuracy of the measurement, the cable length needs to account for thermal variations. As result, a reading of the ambient temperature is performed in every cycle. Introducing this correction we can improve the accuracy of the readings by almost one order of magnitude:

$$l_{real} = l_{ref} \times (1 + \alpha \times \Delta T)$$

Here, α is the thermal expansion coefficient of the wire. Although Remanium has a relative low thermal expansion coefficient (~14×10^{-6} K^{-1}) it has an impact for small gravity differential measurements. This correction allows the detection of small shifts on the local gravity, accounting from tidal gravitational effects. This topic is going to be subject of a future publication.

Besides the period, an indirect measurement of the speed at the origin can be determined based on the travel time of the bob in front of the photogate, the occlusion time, and the equatorial diameter of the 2 kggr ball known as a bob . The speed is then obtained by the simple ratio of these two quantities.

III. Every Cloud Has a Silver Lining

A. Physical pendulum

The first motivation for introducing the physical pendulum is the simple solution when we neglect the correction due to the momentum of inertia which is valid for most cases. However, for very high precision measurements of the pendulum period we cannot disregard this correction.

By introducing the parallel axis theorem for finding the moment of inertia of the sphere whose axis of oscillation is parallel to the axis of the moment body, crossing the centre of gravity, we can state that:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \simeq 2\pi \sqrt{\frac{I_S}{mgl_{cm}}} \quad (physical\ pendulum)$$

and including the moment of inertia of the bob , we get:

$$T \simeq 2\pi \sqrt{\frac{l_{cm}}{g} + \frac{I_{cm}}{mgl_{cm}}}$$

$$T \simeq 2\pi \sqrt{\frac{l_{cm}}{g} + \frac{I_{cm}}{mgl_{cm}}} = 2\pi \sqrt{\frac{l_{cm}}{g}\left(1 + \frac{2r^2}{5l_{cm}^2}\right)}$$

where l_{cm} corresponds to the cable length plus the bob's radius, *r*.

Although this correction can be disregarded on local gravity fluctuations studies, it can be used to address the instruments precision and lead to a discussion on the momentum of inertia and how it compares to other corrections for instance de buoyant force on the reduction of weight.

As we will see in the next section, the physical pendulum correction compares to the measured fluctuations due to the bob's surface irregularities.

B. *Speed at origin fluctuations*

The bob used as the pendulum central mass is a cast iron sphere with 80mm diameter. However, its diameter used as a reference value in the previous section, varies due to the casting process, being the equatorial section slightly elliptical or at least with minor deviations from a circle. If we add on top of this inaccuracy the behaviour of a torsional pendulum, impossible to avoid in a single cable pendulum, we detect a fluctuation in the measured period by the change of the concealment diameter as can be seen in figure 2. This is reflected in the deviation of the measured period with the photogate concealment occurring at different times and giving an "error" in the velocity at origin as the occlusion time slightly changes because the effective diameter varies. As this time of flight is extremely well measured, with less than one microsecond resolution, it is relatively simple to detect the torsional period as displayed in figure 3.

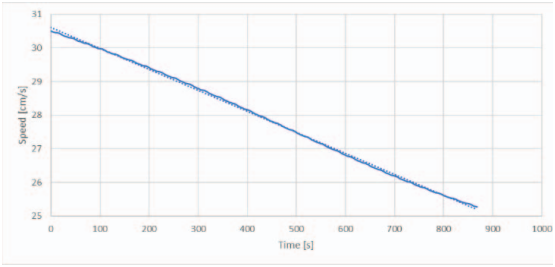


Fig. 2. Measured speed at origin (raw data). Small deviations occur as time pass by due to precession and temperature.

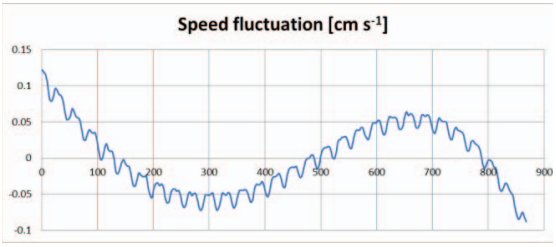


Fig. 3. Variability of the measured speed at origin during a long run where faster fluctuations exists with a period of ~30 s due to the torsional movement and precession.

Taking in consideration a typical velocity at origin, on the order of 0.3 m/s and a timing resolution of 0.16 us effectively we can detect surface irregularities as low as $v \times T = 0.05mm$.

The detection of the torsional period can be made by a sinusoidal fitting on the beating over the pendulum base frequency which can be as low as 0.1%. Alternatively, one can perform a FFT over a long acquisition period. Figure 4 shows the process of decoupling the torsional oscillation from the data by subtracting a first order (linear) adjusted line (dotted line in figure 2) from where the period comes out immediately (almost 30 peaks).

The measurement of the torsional fluctuation period [6] can be extracted from the FFT data as seen in figure 4. The resolution coming out from the FFT is related to the entire acquisition time (871s) and where the 30 counted peaks (FFT bins) emerge on the FTT. Looking closer to the second harmonic (59) is clear that is slight below that number, so we will take the value of 29.5 number of occurrences per the full experience time. We note that just by chance the number of occurrences (29.5) has almost the same figure of the fluctuation period (~871/29.5=29.53s).

Nonetheless, this torsional period can be measured directly by the interception of the oscillations with the fitted line as can be seen in figure 5.

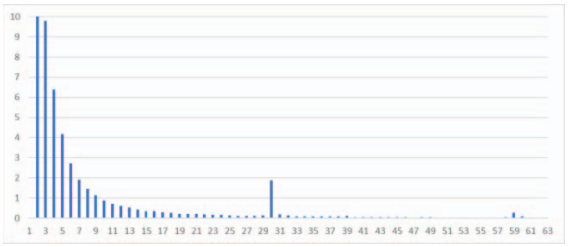


Fig. 4. FFT from the speed at origin showing the number of peaks occurring during the full acquisition time (~15min.). The much lower harmonics relates to an unavoidable precession.

C. *Cable rigidity modulus*

As expected, the measured period from figure 5 is the same as from the FFT and reads ~210/7=30 s. The torsional pendulum can be studied taking into account the effect of the wire torsion (the use of Euler-Lagrange equations is recommended for this). The resulting equations are pretty similar to the oscillatory movement of the pendulum as they result from a similar set of differential equations. A clear analogy can be made between both movements and comparing an exact system to another with the need of approximation. As such the harmonic rotational movement arising from this torsion gives a period of motion that can be show to be equal to and without the need of any approximation:

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{I}{\kappa}}, \qquad I(Sphere) = \frac{2}{5}mr^2$$

The shear or rigidity modulus ν can then be determined from κ after computing it by analysing this spurious oscillation.

$$\kappa = \frac{\nu \pi r_{cable}^4}{2 l_{cable}}$$

Computed values give ~60 GPa in the expected range for chromium alloys such as Remanium.

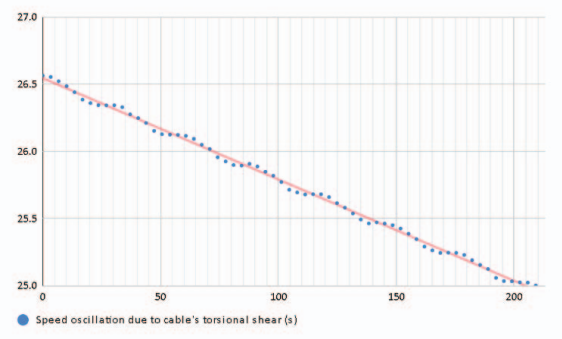


Fig. 5. Detail view of the torsional movement leading to a fluctuation measurement on the speed at origin. From this frequency we can compute the shear or rigidity modulus.

D. Didactics

The detail analysis of the pendulum's data presents a strong basis to address students in a nonconventional way, empowering them inside an inquiry learning space and using a network of experiments. As a matter of fact, they can be posed in front of some questions calling for deeper reflection.

The proposed inquiring sequence could be based on a set of questions after a first use as a standard pendulum experiment. The student can be led to (i) a deeper look in the data and asked for odd data behaviour (ii) bringing up some questions from apparently "errors" from the readings that (iii) end up to be true physics phenomena like the addition of the physical pendulum correction or the torsional effect.

Basing the analysis on this, we can build a model of the pendulum inside three possible modelling categories:

- Total realistic: there's a local gravity, but also effects of torsion in the restraining element (usually the cable elasticity), friction in the pivot point, air friction and other residual forces [8].
- Simplified in forces: there's a local gravity and just that. We exclude all the other possible forces and attempt to give an exact description of the motion [9].
- Simplified in forces and motion: there's a local gravity and the restrictions of the motion keep the motion in a plane, with a set of limitations previously established [10].

Based on the previous categorization, we can achieve a different level of mathematical complexity depending on what approximation we used. This aspect makes pendulums extremely useful for the adaptation of the theoretical model to different student demographics.

So, with a single pendulum we can measure not only the local gravity but also explaine the deviation from the simple pendulum by adding more precise models. Moreover, with a series of samples over a long time (several months) we can identify even the tidal effect due to other celestial objects such as the sun and moon.

IV. Conclusion

Pendulum systems are use in schools and universities around the world every week in numerous curriculums of physics and engineering careers [1]. Nonetheless, its use is limited by the physical infrastructure of the institution and the working hours of the university staff personnel. Despite the fact we live in an increasingly digital world, our education institutions have not yet become one with the *Information Society* [7].

We show here how a systematic use of pendulums in the format of remote experiments can help to improve the effectiveness of physics teaching in school and universities, regardless of the physical location of the student. This improvement would refer to the educational covering and well-understanding of the first basic principles of kinematics and dynamics but can lead in a second step to a more deeply understand of hidden physics in some data.

The flexibility of the remote accessed pendulum system [11] is evidenced through physical/mathematical analysis of simple setups and possible experiments specially oriented to students in the age range we discuss (mainly teenage years). Besides the previous analysis, we present a first look into what these experiments can achieve when they have a global deployment as the one in the *World Pendulum Alliance*, which distributes pendulums over diverse geographical locations, becoming capable of measuring gravity variation across our world's planetary surface.

Remote controlled experiments like this one can be a major asset in an *inquiry learning space*, providing an easy way to the self-discovery of learning contents.

Acknowledgment

This work was a result of a cooperative effort from several Latin American Universities some of them members of the Magellan cluster that embraced the World Pendulum project, namely USM, UChile, PUC Rio, Unb, UESC, UNAD, UniAndes, USMA and UTP, from Chile, Brazil, Colombia and Panama and framed with the support of IST European partners ECM, CTU and UPC from France, Czechia and Catalunya. The authors thank to all of them the continuous support and open access to the data provided by the available on-line pendulum apparatus. Some associated partners emerged during the project giving and additional push on latitude coverage namely UniCV from Cabo Verde, UTFPR from Brazil, University of Magallanes in Chile, Centro Ciência Viva (i) from Algarve and (ii) from the Portuguese Navy and finally the Portuguese Direção-Geral da Administração Escolar which pave the access to some overseas Portuguese schools like the ones in Mozambique and São Tomé e Príncipe.

References

[1] https://wpa.tecnico.ulisboa.pt, 1/7/2022

[2] http://www.elab.tecnico.ulisboa.pt/wiki/index.php?title=World_Pendulum, 1/7/2022

[3] R.B. Neto, H. Fernandes, J. Pereira, A.S. Duarte, "e-lab remote laboratory integrated overview", Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2012 9th Conference.

[4] http://elab.vps.tecnico.ulisboa.pt:8001/, 1/7/2022

[5] Matthews, M. R., Gauld, C. F., & Stinner, A. (Eds.). (2005). The pendulum: Scientific, historical, philosophical and educational perspectives. Springer Science & Business Media.

[6] Tongaonkar, S. S., & Khadse, V. R. (2011). Experiment with Conical Pendulum. European Journal of Physics Education, 2(1), 1-4.

[7] Castells, M. (2011). *The rise of the network society* (Vol. 12). John Wiley & Sons.

[8] Jerzy, W., & Krzysztof, K. (2009). Regular and chaotic motions of an autoparametric real pendulum system with the use of a MR damper. In Modeling, simulation and control of nonlinear engineering dynamical systems (pp. 267-276). Springer, Dordrecht

[9] Wong, WK., Chao, TK., Chen, PR. et al. J. Comput. Educ. (2015) 2: 77. https://doi.org/10.1007/s40692-015-0026-1

[10] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Cengage learning.

[11] Sriarunrasmee, J., Suwannatthachote, P., & Dachakupt, P. (2015). Virtual field trips with inquiry learning and critical thinking process: a learning model to enhance students' science learning outcomes. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 197, 1721-1726.

[12] Klosko S.M., Wagner C.A. (1982), Spherical harmonic representation of the gravity field from dynamic satellite data, Planetary and Space Science

[13] https://www.wolframalpha.com/, 24/5/2022

Bringing the WPA@ELAB Pendulum network closer to secondary education

Acercando la red de Péndulos del WPA@ELAB a la educación secundaria

Carola Hernández
Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes
Bogotá. Colombia
c-hernan@unianes.edu.co

Cristian Yesid Moreno
Facultad de Educación
Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia
c.morenob@uniandes.edu.co

Ricardo Chavarro
Institucion Educativa Departamental
Carlos Abondano Gonzalez
Sesquilé, Colombia
rchavarro7529@gmail.com

Carlos Francisco Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia
crodrigu@uniandes.edu.co

Sofia Moncayo
Departamento de Diseño
Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia
s.moncayos@uniandes.edu.co

***Abstract*—Remote experiments are an opportunity to improve the quality of science education by allowing more people to access high-precision laboratories. This document presents the preliminary results of the design and use of pedagogical material that allows primary and secondary educational institutions to approach the WPA@ELAB pendulum network. The pedagogical material was designed at the Universidad de Los Andes through a collaborative team between professors and undergraduate students. The first implementation was conducted with 10th-grade students from the Carlos Abondano González Departmental Educational Institution. Through a comprehensive qualitative approach, both the teacher and the students were inquired about the learning achieved and the possibilities of improving the pedagogical material. The results show that the material is well received by the students and generates motivation and learning about the MAS related to the pendulum's movement. Among the suggestions, greater precision in describing the materials required for the experiment stands out.**

Keywords— pedagogical material, pendulum network, dissemination of science, institutional collaboration

***Resumen* — Los experimentos remotos constituyen una oportunidad para mejora la calidad de la educación en ciencias al permitir a una mayor cantidad de personas acceder a laboratorios de máxima precisión. Este documentos presenta los resultados preliminares del diseño y uso de un material pedagógico que permita a instituciones educativas de básica y media aproximarse a la red de péndulos WPA@ELAB. El material pedagógico fue diseñado en la Universidad de Los Andes a través de un equipo colaborativo entre profesores y estudiantes de pregrado. La primera implementación se realizó con estudiantes de grado 10 de la Institución Educativa Departamental Carlos Abondano González. A través de una aproximación cualitativa comprensiva se indagó tanto en el profesor como en los estudiantes por los aprendizajes logrados, así como por las posibilidades de mejoras del material pedagógico. Los resultados muestran que el material es bien recibido por los estudiantes, genera motivación y aprendizajes sobre el MAS relacionado con el movimiento del péndulo. Dentro de las sugerencias destacan mayor precisión en la descripción de los materiales requeridos para el experimento.**

Palabras claves —material pedagógico, red de péndulos, diseminación de la ciencia, colaboración institucional

I. INTRODUCCION

El World Pendulum Alliance WPA@ELAB es un proyecto de alianza internacional entre diferentes instituciones de educación superior de Europa y Latinoamérica, tiene como objetivo crear e implementar una red global de experimentos remotos con miras a mejorar la calidad de la educación en ciencias básicas, el cual es cofinanciado por el programa Erasmus+ de la Unión Europea.

Figura 1. Fotografía del mecanismo de activación del péndulo y de los sensores de recolección de información para los experimentos. Péndulo primario Universidad de Los Andes.

Los experimentos remotos son una forma novedosa de acceder a laboratorios con el uso de tecnología. En ellos, los estudiantes acceden por internet a un ambiente real donde se realiza el experimento [1]. En el caso del WPA@ELAB el experimento consiste en poder emplear péndulos precisos controlados a distancia cuyo diseño está orientado a la máxima precisión a través de un montaje mecánico simple y replicable como se observa en la Fig. 1. Para ello, se ha diseñado un software al que se accede en línea y que permite realizar el experimento, colectar los datos y generar archivos con esta información que luego los estudiantes pueden manipular en

Este trabajo es resultado del proyecto WP@ELAB WORLD PENDULUM ALLIANCE, financiado por el programa Erasmus+ de la >Unión Europea (grant agreement 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP).

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00053

sus computadores. A la vez, el montaje tiene una cámara que permite visualizar en tiempo real el movimiento del péndulo.

Hay dos modelos de péndulo diseñados por el proyecto: el péndulo primario WPA@ELAB y el péndulo secundario WPA@FREE, que difieren en tamaño, arquitectura y diseño, siendo sus partes mecánicas similares. La red de péndulos está conformada por un péndulo primario para cada universidad involucrada en el proyecto y diez péndulos secundarios que se ubican en las instituciones aliadas y que permiten ampliar el acceso de posibilidades a variaciones en ubicación (latitud, longitud y altitud) y con ello a la creación de diferentes experimentos y experiencias.

La Universidad de Los Andes, localizada en Colombia, hace parte de las Universidades participantes y ha ubicado su péndulo primario en su campus en Bogotá. Adicionalmente ha establecido alianza con ocho instituciones para instalar los péndulos secundarios y establecer su red. Estas instituciones son: Maloka Centro Interactivo (Bogotá), Universidad de Nariño (Pasto), Instituto Técnico Industrial de Facatativá (Facatativá), Universidad de Ibagué (Ibagué), Universidad del Atlántico (Barranquilla), Institución Educativa Departamental Carlos Abondano González (Sesquilé), Universidad Autónoma del Cauca (Popayán) y la Universidad San Francisco Quito (Quito, Ecuador).

A lo largo del proyecto se han desarrollado diferentes actividades para la diseminación de las ciencias utilizando el péndulo como un detonador de la enseñanza y aprendizaje de conceptos de física y de los procesos de indagación y experimentación. Uno de estos desarrollos es el MOOC de Física Experimental ES (feX) en su versión 2021 [2] que consta de trece (13) actividades pedagógicas e-Learning basadas en la estrategia de Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) y busca fortalecer las competencias referentes a la indagación en física a través del análisis de datos experimentales mediante la implementación de prácticas de laboratorio orientadas al teorema de conservación de la energía haciendo uso paralelo del laboratorio remoto e-Lab.

Otras actividades han estado relacionadas con la generación de Centros de Divulgación Científica. En el caso de la Universidad de Los Andes (https://cdc.uniandes.edu.co/index.php) se han reunido esfuerzos para generar material novedoso, por ejemplo, podcast para divulgar temas científicos y las investigaciones que se realizan por parte de científicos e ingenieros de la universidad. En esta misma dirección y considerando que varias de nuestras instituciones aliadas se dedican a la educación de niños y jóvenes que están en básica y media es necesario desarrollar alternativas pedagógicas adecuadas para el uso de la red de péndulos. Por ello, el propósito de este documento es presentar una primera versión de un material desarrollado en colaboración al interior de la Universidad de Los Andes y que ha sido implementado en la Institución Educativa Departamental Carlos Abondano González (Sesquilé). De esta implementación se desprenden lecciones que permiten mejorar el material de manera que constituya otra forma de aportar a la difusión de la ciencia y a el uso de la red de péndulos WPA@ELAB.

II. Revisión de la Literatura

Una visión socio-cultural del aprendizaje se deprende de las ideas de [3] quien plantea que el pensamiento humano y su desarrollo son inseparables de las prácticas sociales y culturales. Así el aprendizaje puede plantearse como un proceso de negociación de significado [4] - [6] a través del cual los aprendices se van apropiando del conocimiento, las formas de pensar, hacer y comunicar en las comunidades en las que participan. Así como en el uso de los objetos y artefactos que los humanos vamos desarrollando como parte de la condensación de conocimiento que permite solucionar problemas.

Desde esta perspectiva, el conocimiento científico es desarrollado en una de estas comunidades y tiene sus propias formas de generarse, compartirse y validarse [4], [7]. Por ello, es fundamental que las nuevas generaciones participen de manera legitima en las actividades propias de los científicos para poder entender en qué consiste la ciencia y cómo aportar a su desarrollo [4], [8] y [9]. El desarrollo del pensamiento científico tiene una base importante en la indagación y el uso de los experimentos. Algunos estudios muestran que los niveles de aprendizaje en ciencias están altamente influenciados por el aprendizaje desarrollado en los laboratorios [10][11] pues es allí donde se fortalecen habilidades científicas como el planteamiento de hipótesis, la separación de variables y constantes, el análisis de datos, la propagación de errores, y la presentación de resultados.

Adicionalmente, [12] presenta una compilación de estudios desarrollados por cerca de cuarenta investigadores en 16 países que participaron en el proyecto International Pendulum Project (IPP) que permiten mostrar como el estudio del péndulo enriquece los currículos no solo de ciencias y física sino matemáticas, historia de la ciencia y música. En particular es interesante como se destacan en el apartado pedagógico retomar los estudios de Piaget sobre el uso del péndulo para comprender y favorecer la comprensión y manipulación de variables. Nuevamente, esta visión de la enseñanza de las ciencias se orienta a fortalecer el pensamiento científico.

Sin embargo, gran parte de los currículos de ciencias y en particular los de física han sido diseñados por profesores universitarios que se han alejado tanto de la escuela básica y media que terminan generando experiencias poco atractivas para los estudiantes [9]. Adicionalmente, los laboratorios requieren una inversión importante de dinero que no siempre es posible para muchas instituciones educativas [11], por lo cual terminan siendo excluidos de los procesos educativos de los niños y jóvenes. Los experimentos remotos permiten un acceso a laboratorios de alta calidad con un costo relativamente bajo asociado al acceso a internet y el uso de computadores.

Desde esta perspectiva poner a disposición de las instituciones de educación básica y media la red de péndulos es un aporte importante a la calidad de la educación en ciencias que ofrecen pues abre la posibilidad a nuevas prácticas curriculares y pedagógicas. Sin embargo, es necesario considerar de qué manera los profesores y sus estudiantes pueden acercase y utilizar la red. La referencia [13] presenta como la implementación del MOOC de Física Experimental ES (feX) con estudiantes de grado décimo requirió una mejor lectura del contexto llevando a tomar acciones para promover la participación de los estudiantes, así como la formación de los profesores de la institución que les permitió tener un cuidadoso acompañamiento a los procesos desarrollados por los estudiantes.

De igual forma, la propuesta de la Universidad retoma la idea de generar un paquete de artefactos que ayuden a los profesores a acercarse a otras formas de usar los laboratorios.

III. El material pedagógico

A. Diseño del material

Figura 2. Ficha de presentación de la experiencia a los estudiantes. Elaboración propia.

Se conformó un equipo por un profesor del departamento de ingeniería mecánica, una profesora de física, una estudiante de diseño y un estudiante de licenciatura en física con el propósito de crear un material que resultara atractivo para los profesores de colegio. Al tener esta visión interdisciplinaria se buscó que la propuesta tuviera presentes elementos conceptuales de la física tratados de manera pedagógica, que recogiera además la experiencia cercana en el tiempo de los estudiantes del pregrado y les permitiera aportar desde sus nuevos conocimientos en la universidad. Finalmente, el material se orienta a el aprendizaje del movimiento armónico simple para utilizar el péndulo en la clase de física y consta fichas para los estudiantes como la que se presenta en la Fig. 2, una guía para el docente y un kit de materiales para la elaboración de péndulos.

El objetivo a más largo plazo es desarrollar más tarjetas que permitan abordar otros experimentos y que vayan movilizando a los profesores y sus grupos de estudiantes a conocer la red de péndulos y profundizar en experimentos con mayor formalidad matemática.

B. Uso del material en la institución educativa Departamental Carlos Abondano González

La Institución Educativa Carlos Abondano González está ubicada en el municipio de Sesquilé, Cundinamarca, localizado a una hora de Bogotá donde se mezclan ambientes rurales y zonas de recreo dada su cercanía con la capital del país. Esta es una institución de carácter público que ofrece educación de básica, primaria y media. La participación del colegio nace a partir de su alianza con la Universidad de los Andes bajo el marco del proyecto World Pendulum Alliance. En la cual, la institución accede a la instalación de un péndulo remoto dentro de sus instalaciones y de la aplicación del material para así identificar sus fortalezas y debilidades en la enseñanza y aprendizaje de la física.

Figura 3. Tarjeta de materiales empleados en la experiencia. Estos materiales son los que requieren los estudiantes durante la implementación de esta estrategia pedagógica. Elaboración propia.

Para llevar a cabo el uso del material pedagógico, este se entregó al docente de física con varios días de anticipación, de tal manera que el maestro pudiera revisarlo detenidamente. Es importante mencionar que no se le dieron muchas instrucciones al profesor por parte de la universidad, ya que, uno de los objetivos del material es que sea intuitivo y que el docente pueda usarlo sin instrucción externa. Posteriormente, el profesor presentó a los estudiantes la actividad y se les solicitó una serie de materiales que se especifican en las tarjetas como se muestra en la Fig. 3.

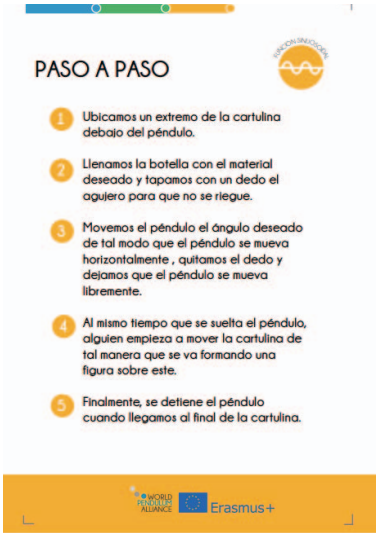


Figura 4. Tarjeta con las instrucciones detalladas para los estudiantes. Elaboración propia.

Durante una segunda sesión de una hora, los estudiantes desarrollaron la práctica experimental usando las instrucciones detalladas en la tarjeta para tal fin y que se presentan en la Fig. 4. En total participaron 60 estudiantes pertenecientes a los dos cursos de décimo en la institución.

IV. MÉTODOLOGÍA

Dado que el propósito de esta implementación era determinar lecciones que permitan mejorar el material y su uso pedagógico para así difundirlo a otros profesores de física, metodológicamente se utiliza una investigación cualitativa [14] de corte comprensivo que permite conocer la experiencia de los participantes para reconocer sus aportes a la mejora del material.

Figura 5. Fotografía del montaje para sostener el péndulo durante la práctica propuesta. Elaboración propia.

Para recolectar la información se utilizó en primer lugar una entrevista semiestructurada al profesor donde se indago por su percepción del material y la manera en que el percibió la recepción y el uso del material por parte de los estudiantes. En segundo lugar, una encuesta con preguntas abiertas a 21 estudiantes seleccionados al azar. Las preguntas realizadas fueron:

- ¿Qué aprendizaje adquirió del uso del material para el estudio del péndulo?
- ¿Qué conceptos creen que se pueden explicar mejor?
- ¿Qué fue lo que más le gustó del material que utilizaron en la clase?
- ¿Hay alguna sugerencia sobre el material utilizado?

En tercer lugar, se tomaron algunas fotografías de la realización de la práctica.

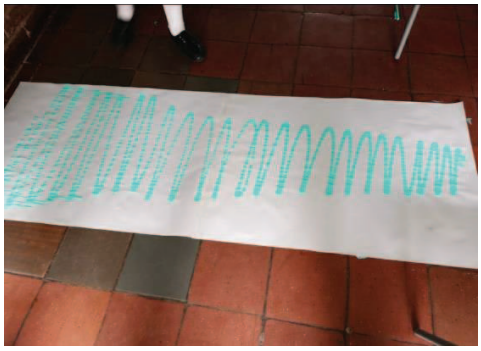


Figura 6. Resultados obtenidos por uno de los equipos participantes de la práctica propuesta. Se evidencia la generación del patrón sinusoidal, la variación de la amplitud debido a la perdida de energía debida al movimiento del péndulo. Elaboración propia.

En todos los casos se siguieron las consideraciones éticas propias de este tipo de estudios que consisten en consentimientos informados por parte de los adultos responsables de los menores de edad, asentimientos informados por parte de estos últimos y la garantía de anonimato por parte de los participantes.

Para analizar la información se transcribió la entrevista al profesor y se identificaron patrones de respuesta en las encuestas realizadas a los estudiantes.

V. RESULTADOS

La Fig. 5 muestra el montaje empleado que sirve de base para el péndulo. La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos por uno de los grupos que realizó la práctica.

En cuanto a la entrevista del docente, estos son los aspectos más importantes para mencionar acerca de la experiencia:

- La experiencia con los estudiantes fue positiva: trajeron una gran variedad de materiales y contaban con una buena actitud. Además, se esmeraban por realizar bien el experimento y no se molestaban cuando sus procedimientos evidenciaban errores por lo cual repitieron el experimento 3 o 4 veces hasta tener los resultados esperados.
- El material le ayudó al profesor para que los estudiantes pudieran ver de manera experimental el movimiento de un péndulo y la oscilación de este, junto con la oscilación de un sistema masa-resorte.
- Los estudiantes estaban motivados al ser una actividad distinta de lo normal.
- En cuanto al material, él menciona que es muy compacto y preciso con respecto la mayoría de las instrucciones, además de muy ilustrativo. Lo que podría mejorarse es la especificación en los materiales, como por ejemplo las características de la pintura.
- Por último, el material cumple con su objetivo de realizar un acompañamiento a los estudiantes para llevar a cabo un experimento.

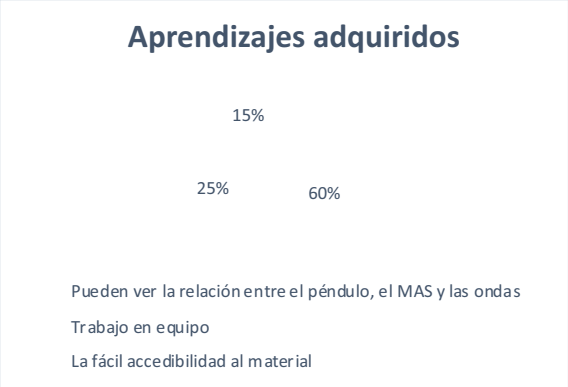


Figura 7. Distribución de los porcentajes de las respuestas a la primera pregunta sobre los aprendizajes adquiridos con la práctica realizada. Elaboración propia.

En relación con las encuestas de los estudiantes, se presentan los resultados pregunta a pregunta. La Fig. 7 muestra los porcentajes de respuesta de los estudiantes respecto a la primera pregunta sobre los aprendizajes que adquirieron con la práctica del péndulo. Allí se identificaron dos patrones en las respuestas

- El material les permitió ver la relación que hay entre el péndulo y el movimiento armónico simple. Además de ver cómo se podían generar ondas a través de un péndulo.
- El trabajo en equipo: varios estudiantes recalcaron que la actividad les brindó un espacio para trabajar en conjunto con sus compañeros. Puesto que, para llevar a cabo el experimento se necesitaban de al menos tres personas y cada una tenía una responsabilidad

En la segunda pregunta hizo evidente que se generó una ambigüedad sobre a que se refería el uso de la palabra "material" en la práctica. Algunos estudiantes pensaron que se les preguntaba acerca de lo que se puede explicar mejor dentro del material que diseño la universidad y otros pensaron en qué pueden explicar ellos mejor después de trabajar con dichos recursos. Sin embargo, los dos tipos de respuesta nos aportan retroalimentación relevante para la mejora de nuestra propuesta. Ahora bien, estas son las tendencias halladas:

- Un tercio de las respuestas se orientó a manifestar que para mejorar el material se podría especificar mejor las instrucciones sobre los materiales y las medidas. Refiriéndose a la densidad o cantidad de pintura que debería de haber y a las medidas, tanto de la cuerda del péndulo como de la altura de la base.
- Otro tercio de los estudiantes expresaron que el material les permitió explicar mejor la oscilación del péndulo dependiendo de la longitud. Además, entendían y podían explicar mejor los conceptos de frecuencia y periodo.
- Un grupo de estudiantes mencionaron que no había nada que se pudiera explicar mejor, haciendo referencia a que el material estaba bien diseñado.
- Un último grupo formado por 3 estudiantes no respondió la pregunta

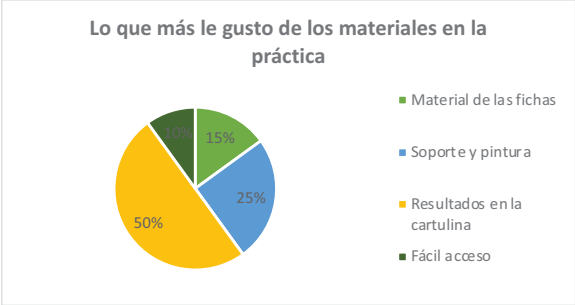


Figura 8. Distribución de los porcentajes de las respuestas a la tercera pregunta sobre los cuáles fueron los aspectos que más les gustaron a los estudiantes de los materiales empleados en la práctica realizada. Elaboración propia.

La tercera pregunta se orientó a indagar sobre qué fue lo que más le gusto de los materiales utilizados, la Fig. 8 muestra los porcentajes de respuesta de los estudiantes. La mayoría de ellos respondió con respecto a lo que más le gusto del material usado (cartulinas, pintura, soportes), mientras que una minoría respondió sobre qué le gustaba más del material pedagógico:

- Para la mayoría de los participantes les resultó atractivo la gráfica que se mostraba en el papel. En palabras de un estudiante "me gustó la oscilación del tarrito de pintura sobre la cartulina y cómo este generaba una onda gráficamente".
- Para un grupo menor, lo que les gustó del material didáctico es la manera en que se explica el paso a paso de todo lo que se hará y las respectivas imágenes que servían de guía. También, la fácil adquisición de los materiales para hacer la actividad.

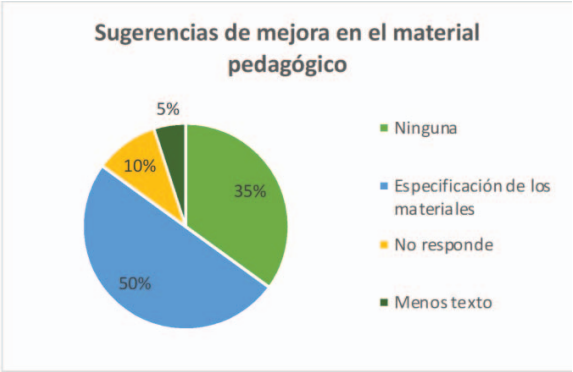


Figura 9. Distribución de los porcentajes de las respuestas a la pregunta sobre sugerencias de mejoras en el material pedagógico que utilizaron. Elaboración propia.

Finalmente, ante la pregunta por sugerencias explícitas de mejoras en el material que utilizaron los estudiantes se identifican dos tendencias:

- La mayoría sugirieron que para mejorar el material se podría especificar mejor las medidas de los materiales, en cuanto a la longitud de la cuerda, la densidad de la pintura, la longitud de la cartulina, la altura de la base.
- Cerca de un tercio de los participantes respondió que no tenía ninguna sugerencia para el material.

.

VI. Discusión

Consecuente con [4], [8] y [9] la propuesta de aproximacion a las ciencias a través de materiales concretos que permitan a los estudiantes visualizar los conceptos les permite también apropiarlos al negociar de manera explícita los significados. En este caso las figuras pintadas y que corresponden a movimientos sinusoidales permite a los estudiantes discutir la relación con el movimiento del péndulo. Adicionalmente, es posible observar los cambios que se generan en el dibujo de la onda al cambiar la longitud de la cuerda y así generar más y mejores relaciones conceptuales.

En relación al diseño del material, se logró el objetivo de ser autocontenido, de fácil uso sin gran cantidad de instrucciones por parte de los miembros de la univerisdad, y que además permite una indagación amplia por parte de los profesores usuarios. Tal como lo expresan los estudiantes y el profesor es importante realizar ajustes a las instrucciones dando mayor precisión a las dimesiones y caracteristicas de los materiales necesarios para la práctica, pues esta retroalimentación permite un mejor uso por parte de nuevos grupos.

Desde el punto de vista de la continuación del desarrollo de las tarjetas, que este primer experimento genere motivación es fundamental porque los engancha con las siguientes experiencias, dando una buena base para logra mayor formalización como expresa [9].

VII. Conclusiones

Los resultados muestran que existe una gama amplia de posibilidades para crear experiencias pedagógicas que utilicen la red de péndulos WPA@ELAB. En el caso específico de la propuesta de la universidad de Los Andes en la generación de las tarjetas que pueden ser utilizadas directamente por los estudiantes constituye una buena apuesta por la creación de alternativas pedagógicas que los aproximen al uso del péndulo y los vayan llevando hacia experimentos más abstractos y formales.

Finalmente, hay que destacar la importancia de la construcción colaborativa del material entre profesores y estudiantes para potenciar su uso en el aula.

AGradecimientos

Los autores agradecen el apoyo al proyecto World Pendulum Alliance, cofinanciado por Erasmus+ de la Unión Europea, liderado por el IST (Portugal), a la IED Carlos Abondano González y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

Referencias

[1] R. Heradio, L. de la Torre, D. Galan, F. Cabrerizo, E. Herrera-Viedma, & S. Dormido, “Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis” in Computers & Education, 98, 14-38, 2016. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360131516300677

[2] Instituto Superior Técnico, “Curso | feX | MOOC Técnico. Física Experimental ES”, Universidad de Lisboa, 2021. https://courses.elearning.tecnico.ulisboa.pt/courses/course-v1:MOOCs+feX+2021_es/course/

[3] L. S. Vygotsky, Mind in society. Cambridge, Ma.: Harvard University Press, 1978.

[4] L. Radford, “The ethics of being and knowing: towards a cultural theory of learning” in Luis Radford, G. Schubring, & F. Seeger (Eds.), *Semiotics in Mathematics Education: Epistemology, History, Classroom, and Culture,* pp. 215–234. Sense Publishers, 2008.

[5] Wells & Claxton, “Introduction: Sociocultural perspectives on the future of education” in G. Wells & G. Claxton (Eds.), *Learning for life in the 21st century: Sociocultural perspectives on the future of education,* pp. 1–17, Blackwell Oxford, 2002.

[6] E. Wenger, Communities of practice: Learning, meaning, and identity. Cambridge university press, 1999.

[7] J. Leach, & P. Scott, Individual and Sociocultural Views of Learning in Science Education. *Science & Educaction*, *12*, 91–113, 2003.

[8] W.-M. Roth, & A. Roychoudhury, The development of science process skills in authentic contexts. *Journal of Research in Science Teaching*, *30*(2), 127–152. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1002/tea.3660300203, 1993.

[9] W.-M. Roth, Authentic School Science, Knowing and Learnig in Open-Inquiry Science Laboratories. (K. Tobin, Ed.) Science and Technology Education Library (Vol. 1, p. 296). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995.

[10] J. Ma & J. Nickerson, Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review, ACM Computing Surveys, 38, 3, 2006, https://dl.acm.org/doi/10.1145/1132960.1132961.

[11] W. Tilman, Assessing Student Learning in a Virtual Laboratory Environment. IEEE Transactions on Education, 53,2, p.p 216-222, 2010, http://www.ecs.umass.edu/ece/wolf/pubs/te2010.pdf

[12] M. R. Matthews, C. F. Gauld & A. Stinner, The Pendulum: Scientific, Historical, Philosophical and Educational Perspectives. The Netherlands: Springer, 2005.

[13] F. A. Torres Payoma, & W. L. García Cruz, Implementación del mooc fex del wp@e-lab en estudiantes de grado décimo en la I.E. Liceo Integrado Fray Francisco Chacón En Sopó, Cundinamarca. Publicaciones e Investigación, 2021, https://doi.org/10.22490/25394088.5600.

[14] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, Metodología de la Investigación, 5ta edición, México: Mc Graw Hill Educación, 2010.

World Pendulum Alliance: an apparatus performance analysis

Junio M. R. Cruz
Instituto de Física (UnB)
Brasília, Brazil
junio@unb.br

Horacio Fernandes
Instituto Superior Técnico (IST)
U.Lisboa, Portugal
hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Gesil S. Amarante-Segundo
Univ. Estadual de Santa Cruz (UESC)
Ilhéus, Brazil
gsamarante@uesc.br

Cassio H. S. Amador
Univ. Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio, Brazil
cassioamador@yahoo.com.br

Raquel S. Brito
Instituto de Física (UnB)
Brasília, Brazil
quelbri@gmail.com

Bernhard G. Enders
Faculdade de Planaltina (UnB)
Planaltina, Brazil
bernhard@unb.br

Pedro A. Mendes Rossa
Instituto Superior Técnico (IST)
U.Lisboa, Portugal
pedro.rossa@tecnico.ulisboa.pt

Manuel Santos
Instituto Superior Técnico (IST)
U.Lisboa, Portugal
manuelbbsantos@tecnico.ulisboa.pt

Rafael Henriques
Instituto Superior Técnico (IST)
U.Lisboa, Portugal
rhenriques@ipfn.ist.utl.pt

***Abstract*— The World Pendulum Alliance is an educational project financed by the European Community (EACEA) that aims at establishing a net of remote access standard pendulums scattered throughout Europe and Latin America, mounted in co-participating Universities, to allow students to collect data to measure the acceleration of gravity in different latitudes and altitudes, and check the results against the global geophysical model. In small angle regimes pendulums are expected to carry harmonic oscillations, however the acceleration dependence on the sine of the oscillation angle induces a slight amplitude dependence of the period of oscillation. In this work we investigate the period dependence on the motion amplitude, which is close to its precision, to investigate the performance of this equipment. Despite operating within the overall uncertainties of the instrument, this procedure revealed a systematic deviation on several pendulums. Possible electronic and mechanical sources are investigated and new ways to improve the overall pendulum performance in newer versions are discussed.**

Resumen— La World Pendulum Alliance es un proyecto educativo financiado por la Comunidad Europea (EACEA) que tiene como objetivo establecer una red de péndulos estándar de acceso remoto repartidos por Europa y América Latina, montados en universidades coparticipantes, para permitir a los estudiantes recopilar datos para medir la aceleración de la gravedad en diferentes latitudes y altitudes, y comparar los resultados con el modelo geofísico global. En regímenes de ángulo pequeño, se espera que los péndulos lleven oscilaciones armónicas, sin embargo, la dependencia de la aceleración en el seno del ángulo de oscilación induce una ligera dependencia de la amplitud del período de oscilación. En este trabajo investigamos la dependencia del período de la amplitud de movimiento, que está cerca de su precisión, para investigar el rendimiento de este equipo. A pesar de operar dentro de las incertidumbres generales del instrumento, este procedimiento reveló una desviación sistemática en varios péndulos. Se investigan posibles fuentes electrónicas y mecánicas y se analizan nuevas formas de mejorar el rendimiento general del péndulo en versiones más nuevas.

The WP@ELAB aka WORLD PENDULUM ALLIANCE is funded by the Erasmus+ program from the EU under the grant agreement 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

Keywords*— *Pendulum, World Pendulum Alliance, Period, Amplitude

I. *INTRODUCTION*

In 2018, the Instituto Superior Tecnico (IST) of Lisbon University engaged the World Pendulum Alliance (WPA) project, an educational project co-financed by the European Community [1], which aimed at promoting remote access experiments for students, focused on co-participation of several Universities in Europe and Latin America. The pendulum was chosen for its simplicity and easy internet access and control, an issue to be diffused and harnessed among the participants, particularly in designing their own future remote experiments to their local community access. The global extent of the project leads naturally to the problem of the acceleration of gravity *g* dependence on the latitude and altitude [2, 3, 4, 5]. Fig. 1 shows the positions of the project's

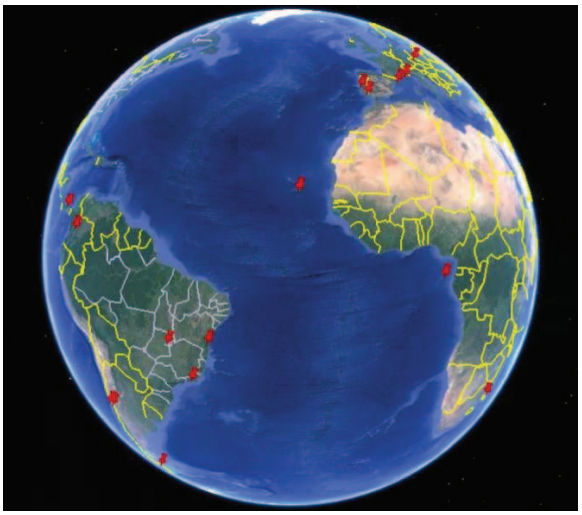


FIG. 1. WPA Pendulum locations across the globe.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00054

initial pendulum configuration[1] throughout the globe. Table 1 summarizes the positions and altitudes of all initially installed pendulums. Normally the equation of motion of a pendulum is setup from the Newton's second law applied to the torque imposed by gravity as the pendulum moves away from the vertical alignment.

Considering θ as the angle the sphere makes with the vertical line, the restoring torque imposed by gravity can be written as

$$\tau = I\alpha = I\frac{d^2\theta}{dt^2} = -mgL\sin\theta \quad (1)$$

where I is the moment of inertia of the pendulum about the pivot point (axis of rotation), m the pendulum mass and L the distance from the axis of rotation to the pendulum center of mass. For small angles it is usual to approximate $\sin(\theta) \approx \theta$ and (1) ends up being rewritten as

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{mgL}{I}\theta. \quad (2)$$

This equation implies a sinusoidal motion whose period is given by

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgL}}, \quad (3)$$

which corresponds to the usual physical pendulum period of oscillation. For a point of mass oscillating at a distance L from the rotation axis, $I = mL^2$ and substituting on (3) we recover the usual simple pendulum period of oscillation

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (4)$$

If we were to incorporate the moment of inertia of the pendulum sphere with a diameter D about its center of mass as it oscillates while hung by a string of length L_s, then the appropriate period given by (3) would become

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L_S + D/2 + D^2/[10(L_S + D/2)]}{g}} \quad (5)$$

Equation (2) is the equation of a harmonic motion, for which the period is independent of the amplitude. However, the sinusoidal dependence of the restoring torque upon the oscillation angle makes it amplitude dependent.

There's no closed form solution to (1) with ordinary functions, although there are several good approximations [6,7,8,9,10]. In what follows we will keep the simple mass approximation in developing the equations ahead to avoid cumbersome unnecessary notation. An exact integral expression for the period can be obtained based on energy considerations. At any instant of time, friction disregarded, the mechanical energy is conserved. Therefore, starting the pendulum at an angle θ_0, corresponding to an elevation h_0, the total energy is the potential energy. This will be equal to the mechanical energy at any other time and angle θ.

Therefore,

$$mgh_0 = mgL(1 - cos\theta_0) = \frac{1}{2}mv^2(\theta) + mgL(1 - cos\theta). \quad (6)$$

The speed of the oscillating mass $v = L(d\theta/dt)$, (6) can be used to isolate the angle variation rate in the following way,

$$d\theta/dt = \pm\sqrt{\frac{2g}{L}(\cos\theta - \cos\theta_0)}. \quad (7)$$

Integrating this expression from the vertical position, which corresponds to the lowest point of oscillation, up to the launch angle θ_0 we obtain 1/4 of the period T. Therefore,

$$T = 2\sqrt{2}\sqrt{\frac{L}{g}}\int_0^{\theta_0}\frac{d\theta}{\sqrt{\cos\theta - \cos\theta_0}}. \quad (8)$$

Substitution of cos θ by $1 - 2\sin^2(\theta/2)$ and a change of variable $\sin\phi = \sin(\theta/2) / \sin(\theta_0/2)$ allow us to recast (8) in terms of complete elliptical integrals of the first kind,

$$T = 4\sqrt{\frac{L}{g}}\int_0^{\pi/2}\frac{1}{\sqrt{1 - k^2\sin^2\phi}}d\phi = \frac{2T_0}{\pi}K(k), \quad (9)$$

where $k = \sin(\theta_0/2)$. The series expansion of this integral, kept to the lowest order, allows us to write the expression for the angular dependence of the period in the following way

$$T(\theta_0) = T_0\left[1 + \frac{1}{4}\sin^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) + \cdots\right], \quad (10)$$

with T_0 being the simple pendulum period given by (4). Equation (10) is the expression we want to evaluate experimentally to see how closely the pendulums of the network follow this predicted behavior.

TABLE I. GEOGRAPHICAL COORDINATES AND ALTITUDES OF THE WPA INITIAL PENDULUMS REFERRED TO IN FIGURE1

Institution	*City (Country)*	*Latitude*	*Longitude*	*Altitude (m)*
CTU	*Prague (Czech Republic)*	*50°06' N*	*14°25' E*	*150*
EC-M	*Marseille (France)*	*43°20' N*	*05°26' E*	*164*
UPC	*Barcelona (Spain)*	*41°25' N*	*02°13' E*	*55*
IST	*Lisbon (Portugal)*	*38°41' N*	*09°12' W*	*20*
CCVAlg	*Algarve (Portugal)*	*37°00' N*	*07°56' W*	*10*
UTP	*Panama City (Panama)*	*09°01' N*	*79°32' W*	*82*
USMA	*Panama City (Panama)*	*09°01' N*	*79°37' W*	*130*
UNIANDES	*Bogota (Colombia)*	*04°36' N*	*74°03' W*	*2500*
UNAD	*Bogota (Colombia)*	*04°36' N*	*74°05' W*	*2650*
EPSTP	*Sao Tome (Sao Tome and Principe)*	*00°21' N*	*6°43' E*	*50*
UESC	*Ilheus (Brazil)*	*14°47' S*	*39°10' W*	*220*
UnB	*Brasilia (Brazil)*	*15°46' S*	*47°52' W*	*1050*
PUC-Rio	*Rio de Janeiro (Brazil)*	*22°54' S*	*43°12' W*	*50*
EPM	*Maputo (Mozambique)*	*25°56' S*	*32°36'E*	*80*
UC	*Santiago (Chile)*	*33°28' S*	*70°40' W*	*552*
UTFSM	*Valparaiso (Chile)*	*33°01' S*	*71°37' W*	*30*
UMag	*Punta Arenas (Chile)*	*53°8' S*	*70°52' W*	*40*

The accuracy of the g measurement with the pendulum motion depends critically on the period of oscillation and on the pendulum length. Therefore, it is of primary relevance to measure them with high precision. The length cannot be easily done on a remote experiment, and it is normally provided to the user by the local team who provides the service. On the other hand, measurements of the period are easily carried out and made available to remote users on the run.

The standard pendulum of this network consists of a 2 kg sphere hung by a thin remanium wire attached to a wedge-shaped support (fulcrum) mounted on top of a tripod roughly 3 m high. The sphere is set to oscillate by a micro-controlled shovel moved by a stepping-motor. Besides controlling the launch mechanism, the microcontroller has a standard quartz crystal whose timing is calibrated against the internet network timing protocol (NTPD) to provide an accurate clock for period measurements. A laser and a photodiode are used to trigger the crossing over the sphere's equator for measuring both the period and the speed of the swinging sphere near the lowest point of transit. Ambient temperature measurements are also provided to the users for temperature corrections of the cable length, if desired.

In this work we intend to explore the setup accuracy limits and its timing instrument by measuring the period dependence on the pendulum's amplitude. Several pendulums were taken to evaluate the performance and existence of any systematic and/or common behavior.

II. NETWORK ACCESS AND DATA ACQUISITION

The WPA pendulums were accessed through the portal at http://elab.ist.utl.pt/rec.web//. This portal is an IST infrastructure dedicated to providing access to different categories (or laboratories) of remote experiments offered by the IST to its students [11]. The WPA pendulums were inserted in a specific laboratory called World Pendulum. In this infrastructure, the access to the pendulums requires the user to have java installed, since the GUI interface was provided as a java application. Another platform is currently under development to provide access entirely within a browser.

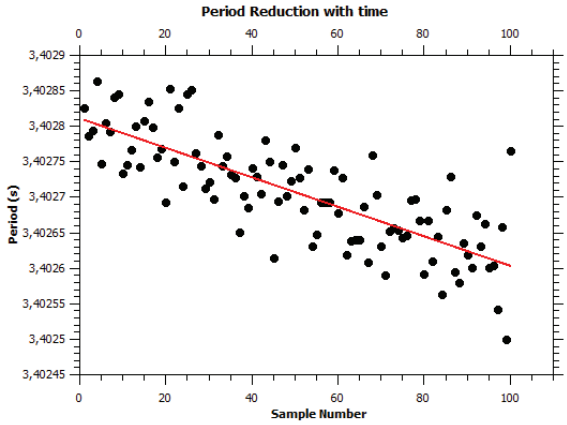


FIG. 2. Reduction of the period as time progresses. This is expected since the amplitude decreases with time and is followed by a period reduction towards the lowest simple pendulum period. The red line is a linear fit just to infer the pendulum period for the initial amplitude. The linear coefficient of this fit was 3.40281 ± 0.00001s. The scatter about the linear fit happens primarily due to random fluctuations and diameter variations as the bob rotates.

The access to the World Pendulum category opens a menu with all the pendulums shown in Fig. 1 and their current availability status indicated by green or red lights. To access one of the green available pendulums, it is necessary to click on the download button to launch the corresponding java application to establish contact between the user and the instrument. A streaming video of the experiment is also available to the user. The world pendulum is just one example of a large class of remote experiments whose access if becoming popular in the internet [12,13].

In this work we have accessed every available pendulum and selected the ones that provided consistent data, as discussed in the next section, to measure the period as a function of amplitude.

III. CORRELATION BETWEEN VELOCITY AND AMPLITUDE

One simple test to evaluate the pendulum setup performance is to check the correlation between the measured pendulum velocity with the amplitude of oscillation. The shovel motion in the initial pendulums was designed to use a telescopic boom mechanism to allow reaching a motion amplitude up to a 0.2 m. This mechanism unfortunately has a drawback of becoming stiff beyond a certain distance, and the whole mechanism is therefore quite dependent on the stiffness and lubrication of each device. Therefore, we need to evaluate whether the specified amplitude was being effectively reached. Energy consideration as in (6) can be used in this regard.

Before we proceed, we must mention that the laser-photodiode barrier used for timing was not designed to be installed in the pendulum vertical position. Therefore, the measured velocity in the lowest point of oscillation should be slightly higher than the valued measured and reported in the data worksheet. Nevertheless, to a first term approximation there is no noticeable deviation. From (6) the pendulum velocity at the sensor positioned at an angle θ_1, corresponding to an offset of x_1 from the vertical position, can be shown to be approximately given by

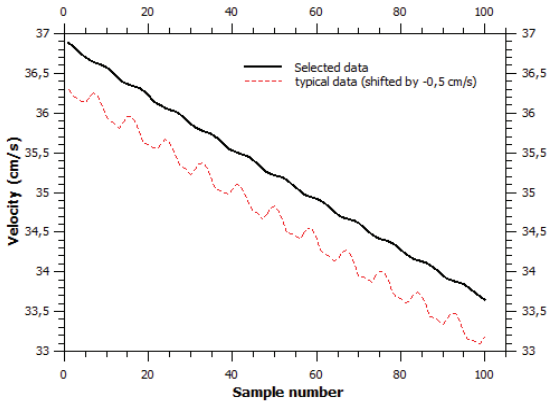


FIG. 3. Reduction of the pendulum velocity due to friction for a 20 cm initial amplitude. The solid black line corresponds to the selected data. Small oscillations can still be seen, despite efforts to select the best results in which the bob oscillates without rotation about the suspension wire. The dashed red curve corresponds to typical data, shifted down by 0.5cm/s for visibility purposes.

TABLE II. MAXIMUM EXPECTED VELOCITIES FOR SOME INITIAL AMPLITUDES

g=9,8 m/s² and L=2,87m	
Amplitude (cm)	**Velocity (cm/s)**
5	*9.26*
8	*14.81*
11	*20.36*
14	*25.92*
17	*31.47*
20	*37.02*

$$v \approx \sqrt{\frac{g}{L}(x_0^2 - x_1^2)} \qquad (11)$$

We have used (11) to provide an indication that the shovel mechanism was working properly. Therefore, we have used the values indicated in table II, calculated with g = 9.8 m/s² for the amplitudes from 5 cm up to 20 cm and for a generic pendulum length of about 2.87 m, as a rough indication of the expected pendulum velocities. Pendulums that we too far off from these values were not considered here.

IV. PERIOD DEPENDENCE ON THE AMPLITUDE - BRASILIA CASE

Before evaluating different pendulums of the WPA we analyzed in more detail the pendulum we have direct access to. The quality of the data can be seen by the period variation over 100 samples (Fig. 2), and the velocity variation due to friction in these 100 samples (Fig. 3). The oscillations seen in these graphs can be traced to a small torsion oscillation of the pendulum bob, which is not exactly spherical. In Fig. 3 we show two sets of data for comparison. The lowest curve shows more pronounced oscillations and was not used in the analysis. Slight changes in the period are due to these shape variations as the mass rotates while oscillating back and forth. Caliper measurements of the bob reveal variations up to 0.5 mm over the 81.4 mm diameter of the bob. For a motion at about 0.37 m/s a variation of 1 mm in the diameter can be responsible for a period misreading of $\Delta t = \Delta d/v = 0,0013$s, i.e., around 1 ms. But the bob rotates by no more than ±30 degrees about the vertical line in the worst cases. For selected data, the observed fluctuation in Fig. 2 is much smaller, about 0.01 ms, impacting in an uncertainty less than 0.001%

In order to measure the dependence of the period upon amplitude, a sequence of measurements with different amplitudes, with 100 samples each, were carried out. For each set a linear fit was done and the initial value, corresponding to the linear coefficient of the fit, was registered as the representative of the period associated with the given initial displacement, a procedure similar to the one indicated in Fig. 2. According to (10), we expect the period to increase with amplitude linearly with $\sin^2(\theta_0/2)$, and the ratio of the angular to the linear coefficients are expected to be 1/4.

The result for the Brasilia pendulum is shown in Fig. 4. According to (10), a linear dependence is expected to cross the vertical axis at the period of the simple pendulum (more precisely at the period given by (5)). As a matter of fact, this extrapolation to zero amplitude is the correct period to be used in obtaining a precise value of g with the following expression

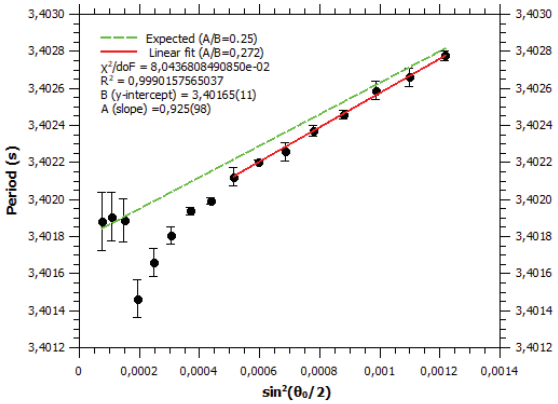


FIG. 4. Period of the pendulum in Brasilia (Brazil) as a function of the sine squared of half the amplitude angle. Each point in the graph corresponds to 1 cm increase in the initial displacement, from 5 to 20cm. According to Eq. (9), the ratio between the angular and linear coefficients should be 0.25, as shown by the dashed green line. The measured ratio of the red line is 0.272, higher than expected. The strong nonlinearity and abrupt changes are discussed in the text.

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}. \qquad (12)$$

Unfortunately, Fig. 4 shows that the observed amplitude variation of the period is not entirely consistent with the expected linear behavior. First, we note that for large amplitudes the results tend to merge the expected values. Therefore, as the amplitude decreases the period decreases faster than expected, and the deviation accentuates for amplitudes below 10 cm. Below 8 cm the period suffers an abrupt increase that coincides with a point at which the system stops measuring the velocity at origin of the bob, since the small amplitude does not allow the bob to cross entirely the laser-photodiode line to provide a velocity measurement by the time-of-flight. The dashed green curve in Fig. 4 displays the expected slope. The red line is the linear fit of the largest angle part of the data. The zero-amplitude limit inferred by the linear fit corresponds to T_0 = 3.40165±0.00011 s. Using this period and L = 2.8675 ± 0.0005 m in (12), we obtain g = 9.783 ± 0.002 m/s². If the period for a 20 cm amplitude were used instead, the value of the calculated g would decrease to 9.777 m/s². The difference, however, is only 0.06% and for most experiments this systematic error can be easily neglected.

Perhaps the most striking feature of this systematic error can be summarized by the following question: what makes the detection system reduce the measured period beyond the expected value? An electronic jitter may be able to shift the start or stop times for different pendulum velocities? Or this may be produced by a mechanical artifact? This will be discussed in the next section.

V. ON THE POSSIBLE ORIGINS OF THE SYSTEMATIC ERROR

A possible origin of the systematic error identified on the previous section is most likely due to the threshold hardware. To increase the precision of the period and the transit time, the photogate is being triggered on the same bob's edge. Nevertheless, in measuring every transit the bob's velocity decreases and the jitter increases due to a slower rise (or fall) time. When the velocity reduces enough that the bob do not

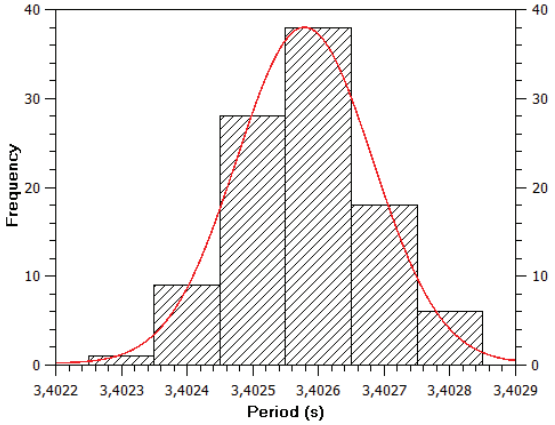


FIG. 5. As the pendulum is a "calibrated source" for time, the measured period is a direct proxy for the clock jitter. Considering the histogram from the period samples, a Full Width at Half Maximum (FWHM) of 2×10^{-4}s (25 ppm) is computed.

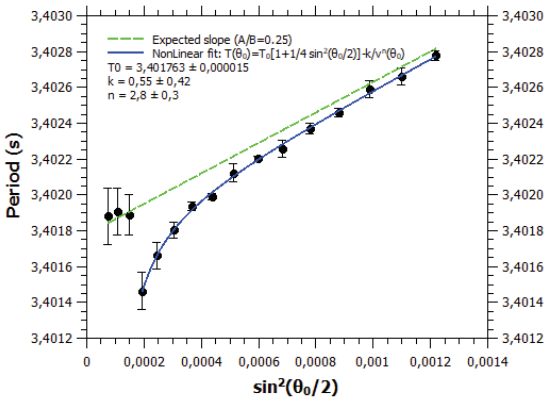


FIG. 6. Fitting of the systematic error with a function inversely proportional to the n-th power of pendulum velocity at the sensor position. The fitting reveals an almost inverse cubic dependence of the systematic error on the pendulum velocity.

cross entirely the photogate, just one trailing edge jitter adds to the measured time uncertainty, and we regain a better timing. Same is to say that the interrupt handler must measure the period according two conditions: (i) either the photogate occlusion occurs at every half-period, meaning that the bob travels a distance above its diameter on the origin and giving four edge transitions or (ii) if the displacement is already very short, only one edge of the bob will stop the laser beam and we will have a full period reading per each falling edge. The last measurement leads to a more precise reading as the jitter is systematically the same but only adds once.

A possible way to mitigate this fact is to add an additional trigger hardware to have a better edge discrimination.

Although this systematic error for long transit times do not affect the period reading above the expected accuracy it is possible to envisage a corrective solution by taking in consideration either in the interrupt handler routine a corrective time factor or by performing an external calibration against a standard clock and performing the corresponding data correction after each run. Nevertheless, this source of mis accuracy is reflected in the time jitter which can be readily computed from a data set. Indeed, the pendulum itself can be considered as an almost ideal clock source and even by assuming a dissipation of energy, the jitter can be over-determined by calculating the standard deviation, as can be seen in Fig. 5 and the former error included is this estimation. However, it should be noted that this is an overestimation since it is calculated over the entire sample, whose value drifts with time as the amplitude reduces due to friction, as shown in Fig. 2.

We observe that the deviation from the predicted behavior is greater for smaller amplitudes, suggesting that this systematic error has an inverse dependence on the pendulum velocity at the sensor location, which can be estimated from Eq. (11). In fact, we wrote (13) in the attempt to describe the observations. It is an expression that assumes the measured period to be given by the expected amplitude dependence (kept to the first order approximation given in (10)), reduced by an error signal inversely proportional to the pendulum velocity to some power n to be found by the fitting procedure.

As can be seen in Fig. 6, it was able to describe the observations quite well. The expression used was

$$T(\theta_0) = T_0\left(1 + \frac{1}{4}\sin^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)\right) - \frac{k}{v^n(\theta_0)}, \qquad (13)$$

where $v(\theta_0)$ was obtained from (11) by rewriting x_0 in terms of the abscissa $\sin^2(\theta_0/2)$. The goodness of the fit led us to investigate the electronics in more detail.

A close look at the photodiode response was carried out in the pendulum of Brasilia by introducing a slit mounted on a micrometer precision holder to block the beam gradually while monitoring the photodiode signal with an oscilloscope. As the beam intensity decreased, a kind of flicker noise with typical capacitor recharging response could be observed superimposed to the average photodetector voltage. This random noise, with an average frequency of about 1 to 2 kHz, could, in principle, lead to an early trigger. However, that was not observed in other pendulums. Also, this early trigger would happen similarly in both start and stop timer signals, thereby not affecting the overall average of the measured period, perhaps only increasing its error bar.

Although the origin of this error is not clear, we have observed it in many pendulums of the network, such as in secondary-pendulums in Ilhéus (UESC-Brazil), Planaltina (FUP-Brazil), Rio Grande do Sul (UFRGS-Brazil), and in the pendulum located in Valparaiso (UTFSM-Chile). Despite our efforts in trying to determine the origin of this systematic behavior, we could not find a full explanation in terms of the electronics, and we were thus led to investigate a mechanical source.

A possible reduction in the period would happen if the fulcrum – the wedge-shaped support to which the pendulum string (see Fig. 7) is attached to – were to get stuck and locked in place. This piece of the pendulum apparatus has a 2 cm stiff steel guide which drops below the base over which the fulcrum rolls following the pendulum string motion. If this guide were fixed in place, the effective pendulum length would be reduced by these 2 cm. Of course, this would be an extreme situation that does not really happen in this full extent. However, the friction at the base of the fulcrum introduces a torque which could make the pendulum oscillate not entirely in its full length, leading to an effective pendulum length

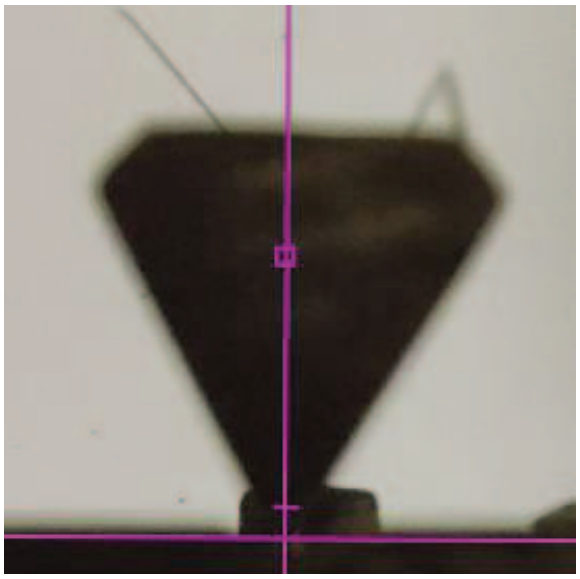


FIG. 7. Captured fulcrum video frame being analyzed with Tracker (https://physlets.org/tracker/).

reduction. This would imply in a period reduction which might explain what is being observed.

We shot the motion of the fulcrum with a cellular camera and applied a video analysis software (https://physlets.org/tracker/) to evaluate its angular motion. In perfect conditions the fulcrum angular motion should follow an almost perfect sinusoidal oscillation. However, the measurements shown at the top of Fig. 8 are not completely sinusoidal, as emphasized from the differences between a perfect sinusoidal fit and the fulcrum motion displayed in the lower graph of this figure. Effectively, the main difference component is at the third harmonic, suggesting that static friction is taking place when the pendulum stops on the extremes. In these points the leap makes a more rectangular curve. Nevertheless, the error is only about 0.2 degrees, recorded with large amplitudes, although we expected the largest systematic error to occur at the lowest ones. Despite a 0.2º error not being considered large, we must say that the largest value of the systematic error in the period is of the order of 0.5 ms, and such a time change can be obtained with a reduction in the effective pendulum length of only 0.8 mm. This is in a range which we think might be related to a restriction on the fulcrum motion. Further observations, specially at low amplitudes are therefore necessary to clarify this mechanism.

VI. CONCLUSION

The pendulum period is generally assumed to be constant for small angles. In fact, this general assumption is normally considered valid due to the usual uncertainty of the timing methods. However, when the uncertainty is small, the amplitude dependence of the periodic motion becomes noticeable, as shown in this work. As a matter of fact, since it has a clear mathematical origin, it can be considered as an intrinsic behavior that the pendulum must obey and, therefore, it can be used to investigate its limits. We have detected a systematic reduction of the period that becomes more pronounced for small initial displacements. Electrical and mechanical possible sources of these deviations were

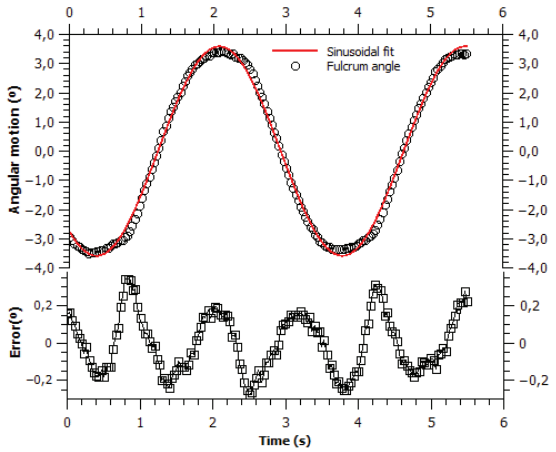


FIG. 8. Measured fulcrum angle as a function of time and a sinusoidal fit. The non-sinusoidal component of this motion is depicted in the lower part of the figure, which shows the difference between the two curves. Over a 3.6º oscillation an error of about 0.2º can be seen.

discussed. Observed electronic sources of jitter can lead to edge time shifts, but should be compensated in period measurements, since it relies on two successive time measurements that should cancel these shifts. So far, we do not have a full explanation for this effect purely in terms of the electronics, although some are clearly hardware/software related. Therefore, we were led to search for a mechanical source of deviation, related to the fulcrum motion. We considered that friction of the fulcrum rolling motion over its base might lead to a very small equivalent pendulum length reduction during its oscillation and associated period reduction. Unfortunately, the data we have is only indicative that this might be a possible source, but further experiments would have to be performed at small amplitudes to evaluate if the fulcrum angular motion is indeed smaller than the bobs angular motion. The observed effect is thus open to further investigations. We must say, however, that the timing deviations discussed in this work are entirely within the instrument's specification and are not relevant for its main purpose of providing a reasonably good estimation of the local gravity acceleration.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the EACEA for providing the conditions that enabled the World Pendulum Alliance project to advance towards a global remote experimentation network that will benefit a large number of students and teachers all around the globe. Financial support from the Agency is kindly acknowledged.

REFERENCES

1 "The World Pendulum Alliance", https://wpa.tecnico.ulisboa.pt, accessed 14 July 2022

2 Lowrie, William, "Fundamentals of geophysics" (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. (2007), ISBN 978-1-60119-744-3.

3 R. B. Neto et al., "World wide remote distributed experiment on e-lab," 2013 2nd Experiment@ International Conference (exp.at'13), 2013, pp. 212-214, doi: 10.1109/ExpAt.2013.6703077.

4 M. Santos et al., "World Pendulum Alliance", 2019 5th Experiment International Conference (exp.at'19), 2019, pp. 272-273, doi: 10.1109/EXPAT.2019.8876518.

5 M. Escobar, H. Fernandes, O. Allard and Y. Erazo, "Pendulum as an Educational Remote Experiment," 2019 5th Experiment International

Conference (exp.at'19), 2019, pp. 388-393, doi: 10.1109/EXPAT.2019.8876473.

[6] F. M. S. Lima and P. Arun, “An accurate formula for the period of a simple pendulum oscillating beyond the small angle regime”, Am. J. Phys. 74, 892 (2006).

[7] R. B. Kidd and S. L. Fogg, “A simple formula for the large-angle pendulum period”, Phys. Teach. 40, 81–83 (2002).

[8] F M S Lima, “Simple ‘log formulae’ for pendulum motion valid for any amplitude”, Eur. J. Phys. 29 (2008) 1091–1098

[9] R. R. Parwani, “An approximate expression for the large-angle period of a simple pendulum,” Eur. J. Phys. 25, 37–39 (2004).

[10] J. P. J. Neto,” Solving the nonlinear pendulum equation with nonhomogeneous initial conditions”, Int. J. Math., Vol. 30, No. 3 2017, 259-266

[11] R.B. Neto, H. Fernandes, J. Pereira, A.S. Duarte, “e-lab remote laboratory integrated overview”, Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2012 9th Conference.

[12] S. Balula, R. Henriques, J. Fortunato, T. Pereira, H. Borges, G. S. Amarante-Segundo, and H. Fernandes, “Distributed e-lab setup based on the raspberry pi: the hydrostatic experiment case study,” in 3 rd Experiment@International Conference - exp.at’15, 2015.

[13] A. Torres, M. Santos, S. Balula, J. Fortunato and H. Fernandes, "Turning the internet of (my) things into a remote controlled laboratory," 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2016, pp. 371-374, doi: 10.1109/REV.2016.7444505.

Perception of Sustainable Development Goal 6 progress in the metropolitan area of Panama

Percepción del avance del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 en el área metropolitana de Panamá

Yazmin L. Mack-Vergara
Experimental Center for Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panama
yazmin.mack@utp.ac.pa

Michelle Ruíz
Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP
Panama, Panama
michelle.ruiz@utp.ac.pa,

***Abstract* — The 2030 Agenda for Sustainable Development contemplates a plan for sustainable development by nations that includes better quality of life for the population, environmental restauration and conservation and prosperity. This Agenda includes 17 Sustainable Development Goals (SDGs). SDG 6 seeks to ensure the availability and sustainable management of water and sanitation. In Panama, there has been some progress within this SDG according to the Sustainable Development Report 2022. However, data for all targets and indicators within SDG 6 were not found. On the other hand, the perception of the population may not match the published data on progress. The aim of this study is to evaluate the perception of the resident population in the metropolitan area of Panama regarding the progress of SDG 6. A survey was conducted in the metropolitan area of Panama based on the targets and indicators of SDG 6. The metropolitan area of Panama, was selected as a first study since it concentrates a high percentage of the country's population. The results cover the population's perception of most of the targets and indicators of SDG 6, complementing the indicators already published for Panama. For most goals, people's perception is that there are still important challenges.**

Keywords — water quality, water quantity, survey, Sustainable Development Goals.

***Resumen* — La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible contempla un plan con miras a un desarrollo sostenible de las naciones que incluya mejor calidad de vida para la población, restauración y conservación del ambiente y prosperidad. Esta Agenda incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El ODS 6 busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento. En Panamá, se han dado algunos avances dentro de este ODS según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022. Sin embargo, no se encontraron datos de todas las metas e indicadores dentro del ODS 6. Por otro lado, la percepción de la población puede no coincidir con los avances publicados. El objetivo de este estudio es evaluar la percepción de la población residente en el área metropolitana de Panamá respecto a los avances del ODS 6. Se realizó una encuesta en el área metropolitana de Panamá con base en las metas e indicadores del ODS 6. Se seleccionó el área metropolitana de Panamá como estudio piloto debido a que concentran un alto porcentaje de la población del país. Los resultados abarcan la percepción de la población en cuanto a la mayoría de las metas e indicadores del ODS 6 complementando los indicadores de seguimiento ya publicados para Panamá. Para la mayoría de las metas, la percepción de las personas es que aún quedan desafíos importantes.**

Palabras claves — calidad de agua, cantidad de agua, encuesta, Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT).

I. Introducción

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible resulta de un proceso de consultas públicas y de interacción con la sociedad civil y otras partes interesadas en distintas naciones del mundo. Esta agenda fue aprobada por las Naciones Unidas en el 2015, 193 estados miembros la adoptaron incluyendo a Panamá y se trata de un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad [1], [2]. Esta agenda consta de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (ver Tabla 1) y 169 metas interrelacionadas. Así mismo, Panamá cuenta con un Plan Estratégico Nacional con Visión de Estado Panamá 2030 [2] y un Plan Nacional de Seguridad Hídrica [3] en los que se consideran distintas metas que se encuentran alineadas con los ODS con base en un diagnóstico de la situación del país y un proceso de consulta pública.

Según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] Panamá se encuentra en la posición 105 de 163 países, mientras que la puntuación del país es de 64.0 lo que ubica al país por debajo del promedio regional de 69.5. Este índice estuvo aumentando desde el 2015. Sin embargo, ha caído desde el 2020, debido entre otros factores, a la pandemia de COVID-19 [5]. En la Tabla 1 se presenta el desempeño promedio por ODS en Panamá, así como la tendencia.

El ODS 6 de Agua limpia y saneamiento busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este objetivo incluye distintas metas. Así mismo incluye indicadores que permiten darle seguimiento a los avances de las metas dentro de este ODS.

Según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4], Panamá aún cuenta con desafíos significativos en este ODS y la tendencia muestra que el puntaje está mejorando moderadamente, pero es insuficiente para alcanzar las metas. En la Tabla 2 se presentan los avances en Panamá según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4]. El reporte indica que, en cuanto a los indicadores de uso de servicios básicos de agua potable y servicios básicos de saneamiento, tratamiento de aguas residuales y de escasez de agua; se encuentran aún distintos desafíos. En cuanto al indicador de extracción de agua, se indica que se ha logrado el objetivo.

Sin embargo, la información presentada en el informe de avances no se encuentra actualizada ya que se presentan datos para los años 2018 y 2020. Además, no se encuentran datos de todos los indicadores contemplados dentro del ODS 6. De hecho, no todos los indicadores presentados en la Tabla 2 coinciden con indicadores contemplados dentro del ODS 6 según la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00055

TABLA 1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y SU DESEMPEÑO PROMEDIO EN PANAMÁ SEGÚN EL REPORTE DE DESARROLLO SOSTENIBLE 2022 [4].

Objetivo de Desarrollo Sostenible	Desempeño promedio		
ODS 1: Fin de la pobreza	🟡	↗	94%
ODS 2: Hambre cero	🔴	↗	48%
ODS 3: Salud y bienestar	🔴	↗	80%
ODS 4: Educación de calidad	🔴	↓	60%
ODS 5: Igualdad de género	🟠	↗	64%
ODS 6: Agua limpia y saneamiento	🟠	↗	73%
ODS 7: Energía asequible y limpia	🟡	↗	77%
ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	🔴	↗	63%
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	🟠	↗	39%
ODS 10: Reducción de las desigualdades	🔴	→	18%
ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	🟠	↑	85%
ODS 12: Consumo y producción responsables	🟠	↑	85%
ODS 13: Acción por el clima	🟠	→	63%
ODS 14: Vida submarina	🔴	↗	66%
ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	🔴	↓	58%
ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas	🔴	↗	67%
ODS 17: Alianzas para lograrlos objetivos	🔴	↗	40%

🔴	Quedan desafíos importantes	↓	Decreciendo
🟠	Quedan desafíos significativos	→	Estancado
🟡	Los desafíos permanecen	↗	Mejorando moderadamente
🟢	ODS logrado	↑	En camino o manteniendo el logro del ODS
⚪	Información no disponible	⚪	Información no disponible

TABLA 2 DESEMPEÑO POR INDICADOR DEL ODS 6 EN PANAMÁ SEGÚN EL REPORTE DE DESARROLLO SOSTENIBLE 2022 [4].

Indicador	Desempeño			Observaciones
Población que utiliza al menos servicios básicos de agua potable	🟡	↗	94.37% al 2020	Tal como beber agua de una fuente mejorada, siempre que el tiempo de recolección no sea superior a 30 minutos para un viaje de ida y vuelta, incluida la fila.
Población que utiliza al menos servicios básicos de saneamiento	🟠	↑	84.57% al 2020	Tal como una instalación de saneamiento mejorada que no se comparte con otros hogares.
Extracción de agua dulce	🟢	⚪	0.90/12.5 al 2018	La relación entre el agua dulce total extraída y el total de recursos renovables de agua dulce, después de tener en cuenta los requisitos de agua del ambiente.
Aguas residuales antropogénicas que reciben tratamiento	🟠	⚪	23.10% al 2018	El porcentaje de aguas residuales que son tratadas, normalizadas por la población conectada a instalaciones centralizadas de tratamiento de aguas residuales.
Consumo de agua escasa incorporado en importaciones	🟠	⚪	3038.82 m^3 H_2O eq/capita al 2018	Consumo de agua ponderado por índices de escasez.

Se observa además que, para algunas metas, los indicadores no representan exactamente lo que se indica en la meta. Por ejemplo, en la meta 6.1 si bien se indica que el agua debe tener un precio asequible para todos, no hay un indicador referente al precio del agua.

Debido a que los ODS buscan mejorar la calidad de vida de las personas, es necesario también evaluar y considerar la percepción de la población en cuanto a estos objetivos y metas [6]–[8]. En este sentido, el objetivo de este estudio es evaluar la percepción de la población residente en el área metropolitana de Panamá respecto a los avances del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos por medio de una encuesta cuyas preguntas se basan en las metas e indicadores del ODS 6 según la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

II. METODOLOGÍA

Con la finalidad de evaluar la percepción de la población residente en el área metropolitana de Panamá respecto a los avances y cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, se realizó una encuesta de carácter cualitativa. La encuesta se tituló "Agua y saneamiento en el área metropolitana de Panamá" ya que el término ODS puede ser desconocido para algunas personas. Esta encuesta se elaboró con base en las metas e indicadores del ODS 6 y utilizó preguntas cerradas con categorías u opciones de respuesta delimitadas.

La encuesta se estructuró en Microsoft Forms y se divulgó por distintos medios digitales incluyendo correo electrónico, WhatsApp e Instagram. Además, en la descripción de la encuesta se colocó el objetivo de este estudio para que los encuestados conocieran el objetivo del levantamiento de datos. La encuesta se aplicó entre los días 6 al 15 de julio de 2022.

A. Población y muestra

Para este estudio se consideró el área metropolitana de Panamá que incluye los distritos de Panamá y de San Miguelito (Fig. 1). Así mismo, la población a considerar fue toda aquella mayor de 18 años, que de acuerdo con las proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos al 2020 correspondía a 1,180,966 personas [9]. Por lo que, la población de esta investigación fue de tipo finita.

Fig. 1 Distrito de Panamá (naranja) y distrito de San Miguelito (rojo).

El tipo de muestra seleccionado fue de tipo no probabilística de participantes voluntarios o autoseleccionado, pues las personas voluntariamente aceptaron la invitación a contestar el formulario en línea [10]. Se consideraron como

variables sociodemográficas: edad, género, residencia y la situación laboral.

B. Estructura de la encuesta

La encuesta se dividió en tres secciones. La primera sección sobre datos generales de los encuestados (variables socioeconómicas), la segunda sección cuenta con preguntas con base en las metas del ODS 6 y la tercera sección cuenta con preguntas con base en los indicadores del ODS 6. Finalmente, se colocó un campo para observaciones y sugerencias sobre la encuesta.

Las preguntas se enfocan en la percepción del público respecto a la situación actual del ODS 6 a pesar de que las metas e indicadores hacen referencia en su mayoría al año 2030. Las preguntas basadas en metas que hacen referencia a "nivel mundial" se modificaron para enfocarlas a nivel del área metropolitana de Panamá.

No se incluyeron preguntas respecto al grado de gestión integrada de los recursos hídricos (indicador 6.5.1), proporción de la superficie de cuencas transfronterizas con un arreglo operacional para la cooperación en la esfera del agua (indicador 6.5.2) y cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo (indicador 6.6.1) ya que se trata de información técnica que usualmente la población no tiene como observar.

C. Análisis

Los resultados se agruparon según las metas del ODS 6 [1]. Para cada pregunta se presentan los resultados en cantidad de respuestas por opción y en porcentajes y se discuten de forma paralela. En el caso de preguntas basadas en los indicadores del ODS 6, los resultados se comparan con los avances según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] con base en los rangos de porcentajes de avance.

III. Resultados y Discusión

Se recibieron 496 respuestas al 15 de julio de 2022. Sin embargo, 99 participantes seleccionaron la opción "Otro" en cuanto a lugar de residencia, lo que los coloca fuera del área de estudio. Además, 3 participantes colocaron la opción de "Menor de 18" en el rango de edad, lo que los coloca fuera del rango de edad determinado para este estudio. De estos 3 participantes menores de edad, 2 seleccionaron la opción "Otro" en cuanto a lugar de residencia por lo que finalmente se cuenta con 396 respuestas consideradas para este estudio.

A continuación, se presentan y discuten los resultados de la encuesta.

A. Variables sociodemográficas

En cuanto a los rangos de edad (Fig. 2), la mayoría de los encuestados se encuentran en el rango de edad de 18 a 24 años (41.9%) y 25 a 34 (24%). Luego se distribuyen en los rangos de 35 a 44 (8.8%), 45 a 54 (10.6%), 55 a 64 (9.8%) y mayores de 65 (4.8%).

En cuanto al género (Fig. 3), la mayoría de los encuestados son del género femenino (59.6%), seguido por 39.9% del género masculino y el 0.5% de los encuestados seleccionó la opción de otros.

En cuanto a la situación laboral (Fig. 4), 43.7% de los encuestados son estudiantes, seguido por 47% de empleados ya sea del sector público o privado. El resto se distribuye en las categorías de desempleado (1.3%), independiente (2.8%), jubilado (4.3%), retirado (0.5%) y otros (0.5%).

Por último, 73.2% de los encuestados residen en el distrito de Panamá, mientras que el resto (26.8%) reside en el distrito de San Miguelito (Fig. 5). Estos valores son proporcionales a la población de cada distrito.

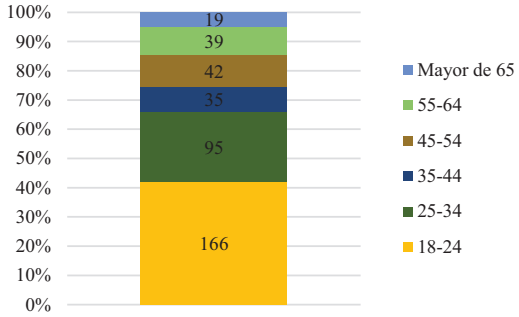


Fig. 2 Rango de edad de quien responde la encuesta.

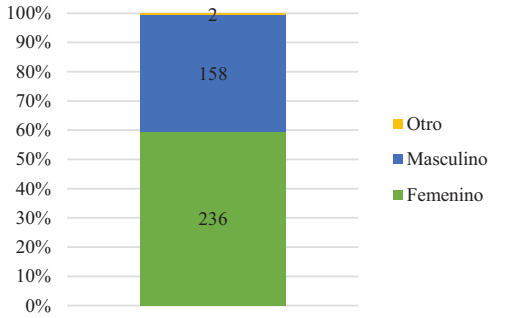


Fig. 3 Género de quien responde la encuesta.

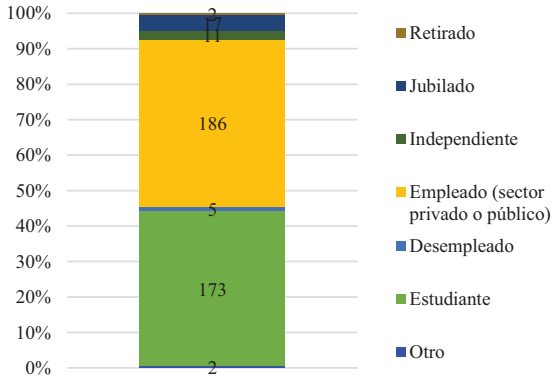


Fig. 4 Situación laboral de quien responde la encuesta.

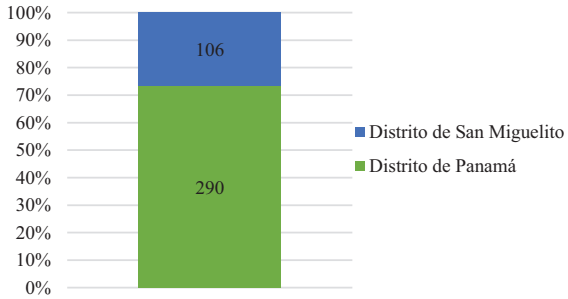


Fig. 5 Lugar de residencia de quien responde la encuesta.

B. Resultados de la encuesta de percepción

A continuación, se presentan los resultados de la encuesta para las distintas preguntas agrupadas por metas del ODS 6 [1].

1) Meta 6.1

En cuanto a la percepción sobre el acceso al agua potable, 68% de los encuestados considera que su comunidad tiene acceso (Fig. 6). Es importante mencionar, que en muchos casos si bien se cuenta con servicio de suministro de agua, el mismo se da de manera intermitente. En cuanto al precio del agua, 88% considera que el mismo es asequible (Fig. 6). En Panamá el precio del agua es de 0.25 balboas por m^3 en promedio y se considera un precio bajo incluso a nivel mundial [3].

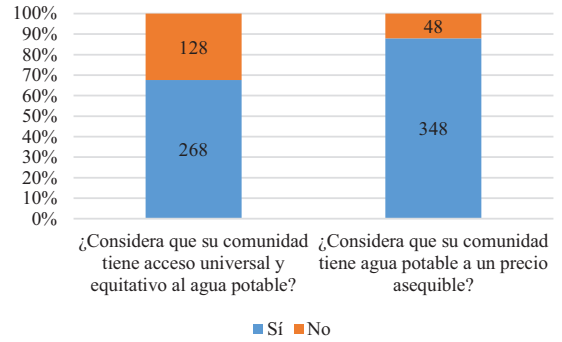


Fig. 6 Preguntas referentes a la meta 6.1 del ODS 6.

En cuanto a la percepción sobre el porcentaje de la población que dispone de suministro de agua potable de forma segura (Fig. 7), solo 38% de los encuestados considera que el porcentaje está entre 76 y 100% de la población.

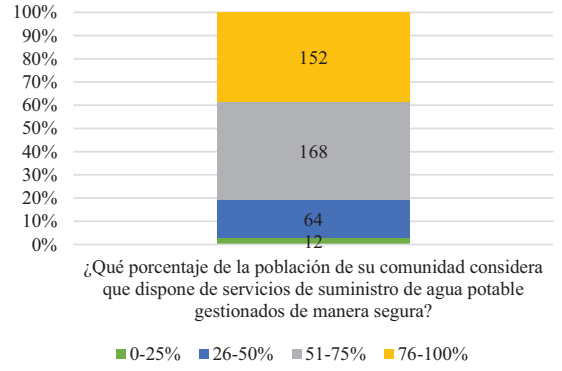


Fig. 7 Pregunta referente al indicador 6.1.1 del ODS6.

Comparando estos resultados con los avances presentados en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4], se coincide con que siguen existiendo desafíos. Sin embargo, se observa una discrepancia con el porcentaje de avance del indicador de población que utiliza al menos servicios básicos de agua potable (94.37% al 2020 según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4]) aun cuando la encuesta se realizó en el 2022; es decir, dos años después del último dato de avance publicado. Igualmente, el estudio de Mora-Alvarado (2018) [11] indica que Panamá contaba con una cobertura de agua para consumo humano por tubería de 94.6% (estimado de 74.6% con calidad de agua potable), situación al 2016.

2) Meta 6.2

En el caso de la percepción sobre el acceso a saneamiento (Fig. 8), 57% de los encuestados indica que su comunidad tiene acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados, 41% indica que su comunidad tiene acceso a servicios de saneamiento e higiene equitativos y 17% indica que aún existe la defecación al aire libre en su comunidad. Se esperaba una respuesta más positiva considerando proyectos como el Saneamiento de Panamá que se viene desarrollando desde el 2006 (Etapa I) y 2014 (Etapa II) y que conlleva redes de alcantarillado sanitario, colectoras sanitarias, sistema interceptor y planta de tratamiento de aguas residuales para los distritos de Panamá y San Miguelito [12].

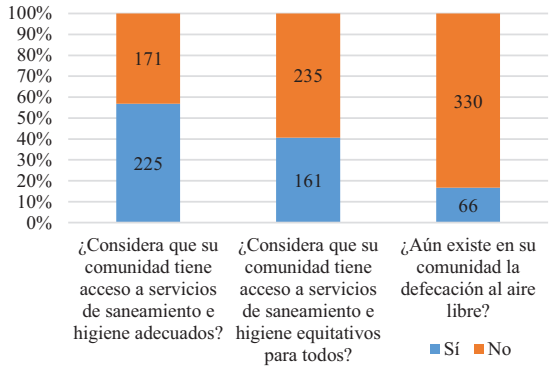


Fig. 8 Preguntas referentes a la meta 6.2 del ODS 6.

En cuanto a la percepción sobre el porcentaje de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados de manera segura y porcentaje de la población que utiliza instalaciones para el lavado de manos con agua y jabón (Fig. 9), solo el 24 % y el 36% respectivamente considera que el porcentaje está entre el 76 y 100% de la población.

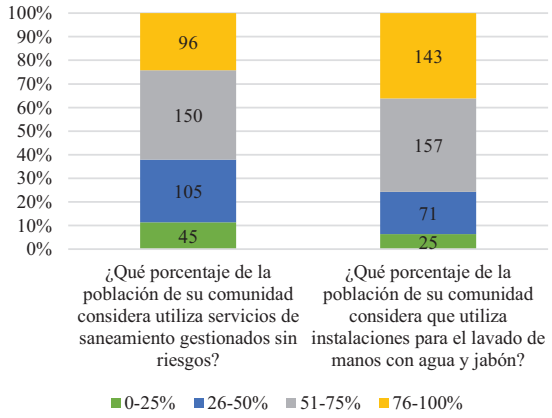


Fig. 9 Preguntas referentes al indicador 6.2.1 del ODS6.

Comparando estos resultados con los avances presentados en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4], se coincide con que siguen existiendo desafíos significativos. Sin embargo, se observa una discrepancia con el porcentaje de avance del indicador de población que utiliza por lo menos servicios de saneamiento básico (84.57% al 2020 según el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4]), aun cuando la encuesta se realizó en el 2022; es decir, 2 años después del último dato de avance publicado.

Con base en la meta 6.2, se evaluó además la percepción en cuanto a la atención que se le presta a las necesidades de la mujer y a grupos vulnerables en cuanto a servicios de saneamiento e higiene (Fig. 10). Solo el 33% y 17% de los encuestados indicaron que sí se consideran a las mujeres y personas en vulnerabilidad, respectivamente. Por lo que se identifica que sigue existiendo una necesidad de inclusión de estos grupos y sus necesidades en cuanto a servicios de higiene y saneamiento.

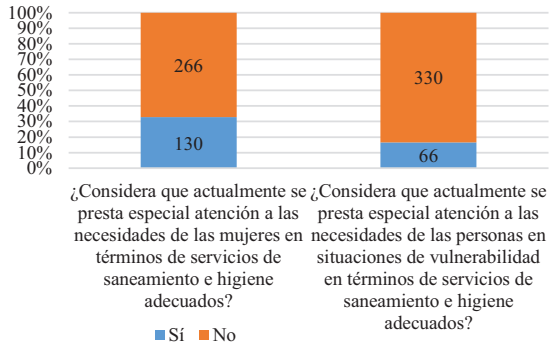


Fig. 10 Preguntas referentes a la meta 6.2 del ODS 6.

3) Meta 6.3

Además de la cantidad de agua, es importante considerar la calidad del agua por lo que es necesario considerar la percepción sobre la contaminación de los cuerpos de agua [13], [14] (Fig. 11). En este aspecto, solo 30% de los encuestados considera que se he reducido la contaminación del agua y 45% de los encuestados considera que se ha reducido el porcentaje de aguas residuales sin tratar. Además, se evaluó la percepción sobre reciclaje y reutilización de agua. En este caso, solo 19% de los encuestados consideran que sí han aumentado estas prácticas.

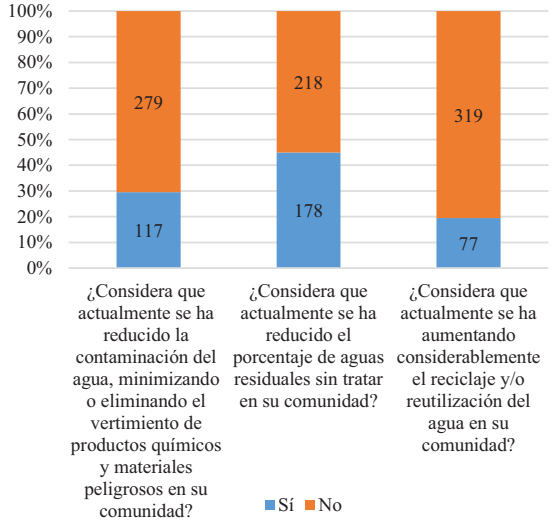


Fig. 11 Preguntas referentes a la meta 6.3 del ODS 6.

En cuanto a la percepción sobre el porcentaje de aguas residuales que son tratadas de manera segura y porcentaje de masas de agua de buena calidad (Fig. 12), solo el 17 % y el 8% respectivamente considera que el porcentaje está entre el 76 y 100% de la población.

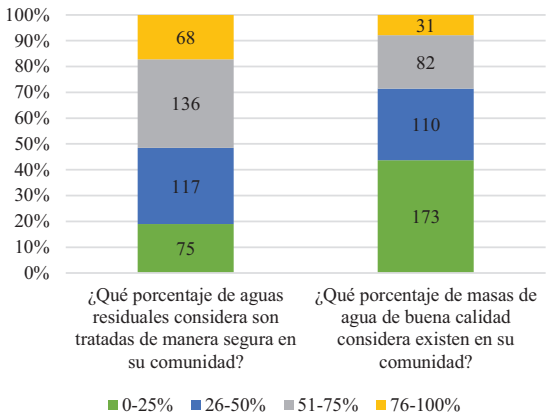


Fig. 12 Pregunta referente a los indicadores 6.3.1 y 6.3.2 del ODS6.

Comparando estos resultados con los avances presentados en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4], se coincide con que siguen existiendo desafíos significativos. En este caso el indicador de aguas residuales antropogénicas que reciben tratamiento, publicado en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] fue de 23.10% al 2018. Tanto en los resultados de la encuesta como en el indicador publicado en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4], el avance en cuanto a tratamiento de aguas es muy bajo. Sin embargo, es de conocimiento público que, a nivel del área metropolitana de Panamá, se está trabajando en el proyecto de Saneamiento de Panamá [12] por lo que se espera que este indicador mejore.

4) Meta 6.4

En cuanto a eficiencia en el uso del agua y abastecimiento de agua dulce (Fig. 13), solo el 12% de los encuestados considera que hay un uso eficiente de agua y el 33% considera que el nivel de abastecimiento de agua dulce es alto (≥90%). En este aspecto, en Panamá se estima que las pérdidas en la red de distribución de agua son de aproximadamente 40 a 48% [3] y se encuentran muchos casos de roturas de tuberías y pérdidas visibles en la red de distribución de agua lo que contribuye a que la percepción de la ciudadanía en cuanto a eficiencia no sea positiva. Por otro lado, 70% considera que sí habrá un cambio en la eficiencia del uso de agua con el tiempo (Fig. 14).

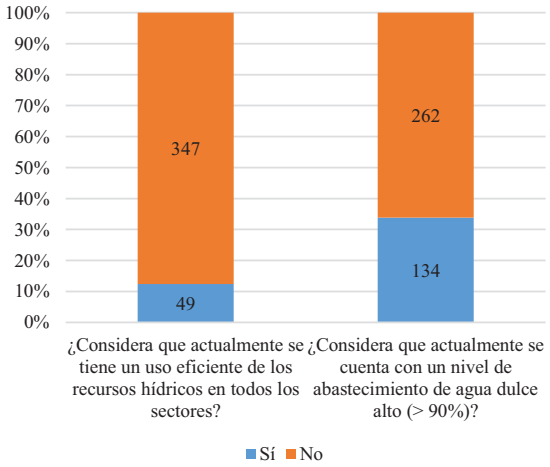


Fig. 13 Preguntas referentes a la meta 6.4 del ODS 6.

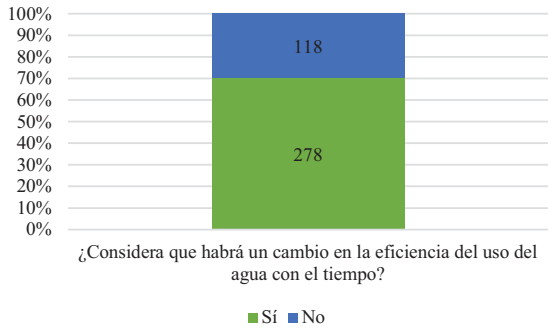


Fig. 14 Pregunta referente al indicador 6.4.1 del ODS6.

En este estudio se evaluó también la percepción en cuanto al estrés hídrico (Fig. 15). En esta pregunta se utilizó la definición de estrés hídrico como extracción de agua dulce como proporción de los recursos de agua dulce disponibles [1]. El 42% de los encuestados considera que el estrés hídrico es medio y el 16% considera que el nivel de estrés es alto en su comunidad.

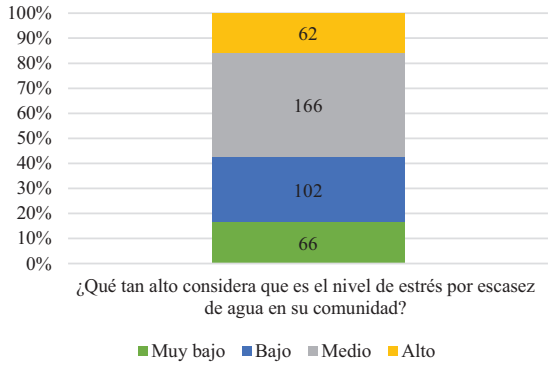


Fig. 15 Pregunta referente al indicador 6.4.2 del ODS6.

Dentro de la meta 6.4, podemos asociar el indicador de extracción de agua dulce publicado en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] que se define como la relación entre el agua dulce extraída y los recursos renovables de agua dulce. En el reporte se indica que este indicador se ha logrado. Esto se debe a que Panamá cuenta con abundantes recursos hídricos por lo que la relación entre agua extraída y los recursos hídricos del país aún es baja. Sin embargo, no necesariamente significa que seamos eficientes y debido a que existen límites en lo que se refiere a consumo sostenible de agua, debemos conservar el agua para garantizar que las generaciones futuras también cuenten con estos recursos [15]. Esto se ve reflejado en los resultados de la encuesta aplicada en este estudio.

El indicador de consumo de agua escasa incorporado en importaciones publicado en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4], definiendo escasez de agua como consumo de agua ponderado por índices de escasez, no se logró asociar con ninguna de las metas del ODS 6.

5) Meta 6.5

Para evaluar la percepción sobre la meta 6.5, se consultó al encuestado si considera que se tiene una gestión integrada de los recursos hídricos en todos los niveles, definiendo la gestión integrada del recurso hídrico como un proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante, pero de manera equitativa, y sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas [1]. Solo el 22% de los encuestados respondió de forma positiva a esta pregunta, lo que apunta a que esta meta aún cuenta con importantes desafíos (Fig. 16).

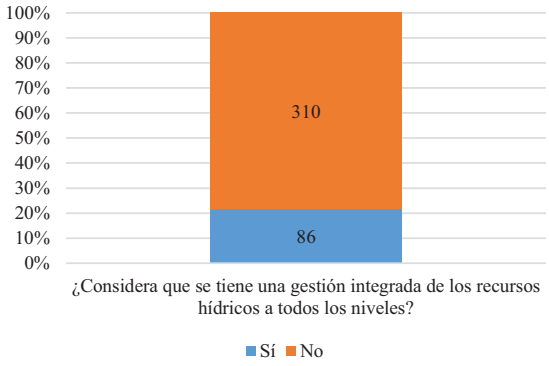


Fig. 16 Preguntas referentes a la meta 6.5 del ODS 6.

Para esta meta no se encontraron datos de avances en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] por lo que los resultados de la encuesta aplicada en este estudio son de gran importancia para tener una idea sobre el estado de esta meta al 2022.

6) Meta 6.6

Para contar con una suficiente cantidad y adecuada calidad de agua, es necesario que los ecosistemas se encuentren en buenas condiciones [16]. Para evaluar la percepción sobre la meta 6.6, se consultó si el encuestado considera que se han protegido y restablecido los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos. Solo el 20% de los encuestados respondió de forma positiva a esta pregunta lo que apunta a que está meta aún cuenta con desafíos importantes (Fig. 17). A nivel del área metropolitana, se observa que, aunque contamos con algunas áreas verdes dentro de la ciudad, las misma se ven cada día más amenazadas por un desarrollo urbano poco organizado lo que requiere de especial atención.

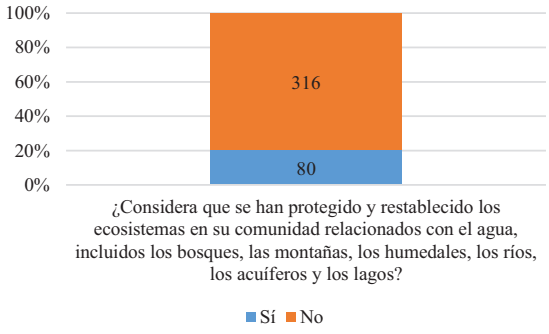


Fig. 17 Preguntas referentes a la meta 6.6 del ODS 6.

Para esta meta no se encontraron datos de avances en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] por lo que los resultados de la encuesta aplicada en este estudio son de gran importancia para tener una idea sobre el estado de esta meta al 2022.

7) Meta 6.a

Para evaluar la percepción sobre la meta 6.a, se consultó si la persona considera que su comunidad ha tenido cooperación internacional y/o apoyo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización. Solo el 14% de los encuestados respondió de forma positiva a esta pregunta lo que apunta a que esta meta aún cuenta con desafíos importantes (Fig. 18).

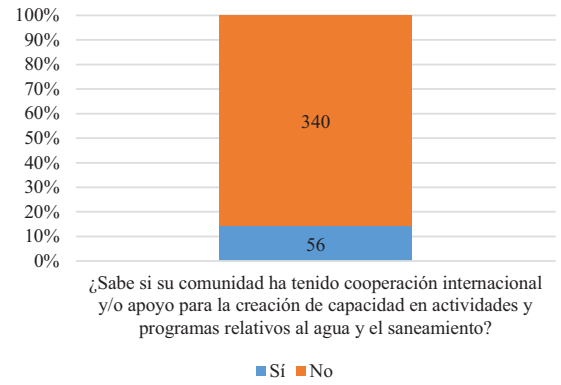


Fig. 18 Preguntas referentes a la meta 6.a del ODS 6.

Además, se consultó sobre la asistencia oficial que ha tenido la comunidad del encuestado, destinada al agua y el saneamiento, que forma parte de un plan de gastos coordinados del gobierno. Donde la asistencia oficial es toda transferencia financiera (donaciones o préstamos) y técnica (conocimientos) otorgada por organismos oficiales (estatales, locales, universidades públicas y organismos ejecutivos) de los países donantes que tiene como objetivo promover el desarrollo y bienestar social y económico. En este caso la mayoría de los encuestados seleccionó la opción de "Poca" asistencia oficial (Fig. 19). En esta meta, es posible que la población no tenga conocimiento de los programas de cooperación ya que no siempre se divulgan.

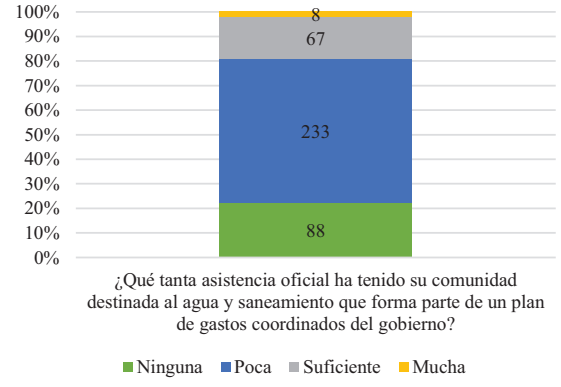


Fig. 19 Pregunta referente al indicador 6.a.1 del ODS6.

Para esta meta no se encontraron datos de avances en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] por lo que los resultados de la encuesta aplicada en este estudio son de gran importancia para tener una idea sobre el estado de esta meta al 2022.

8) Meta 6.b

Para evaluar la percepción sobre la meta 6.b, se consultó si la persona apoya y participa en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento de su comunidad. El 61% de los encuestados respondió de forma positiva a esta pregunta lo que apunta a que aún hay desafíos y falta colaboración (Fig. 20).

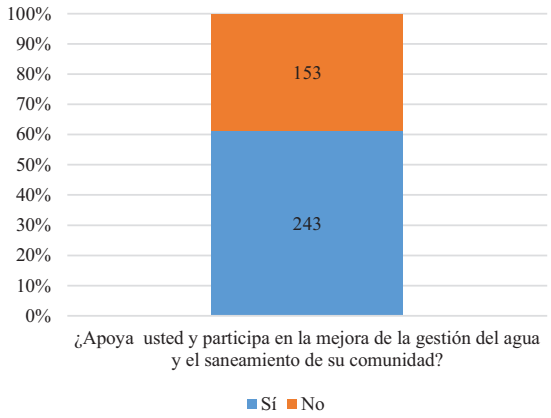


Fig. 20 Preguntas referentes a la meta 6.b del ODS 6.

Además, se consultó sobre la colaboración de las dependencias administrativas locales en la participación de las comunidades en la ordenación del agua y el saneamiento, donde las dependencias administrativas locales se definen como todas las unidades del gobierno que ejercen facultades en forma independiente en las diversas jurisdicciones rurales o urbanas del territorio de un país. El 61% de los encuestados seleccionó la opción de "Poca" colaboración (Fig. 21).

En esta meta a diferencia de la meta 6.a, la población usualmente sí conoce los programas de participación de las comunidades ya que se llevan a cabo de forma sectorial por medio de los municipios y juntas comunales, por ejemplo.

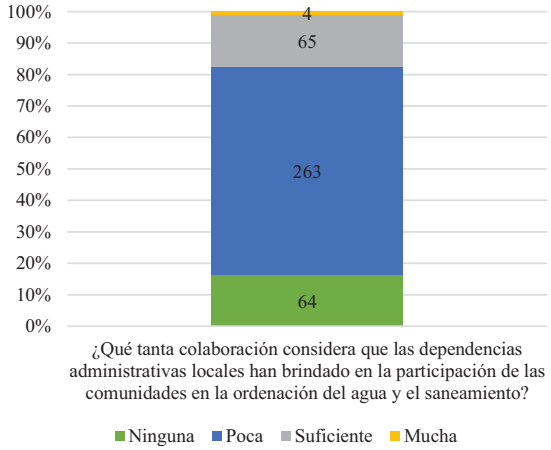


Fig. 21 Pregunta referente al indicador 6.b.1 del ODS6.

Para esta meta no se encontraron datos de avances en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 [4] por lo que los resultados de la encuesta aplicada en este estudio son de gran importancia para tener una idea sobre el estado de esta meta al 2022.

IV. Conclusiones

En esa investigación se evaluó la percepción de la población residente en el área metropolitana de Panamá, República de Panamá respecto a los avances del ODS 6 de Agua limpia y saneamiento por medio de una encuesta basada en las metas e indicadores del ODS 6.

Debido a que no todo lo que se indica en las metas se puede medir con los indicadores propuestos en la Agenda 2030, en algunos casos es necesario implementar indicadores adicionales.

Se revisaron los avances publicados en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 para Panamá en cuanto al ODS 6. Los datos publicados indican que aún hay desafíos en cuanto a servicios básicos de agua para consumo y saneamiento. También se indican desafíos en cuanto al tratamiento de aguas residuales y eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, algunos datos publicados sobre los avances de estos indicadores no están actualizados y solo se encontraron datos publicados para los indicadores 6.1.1, 6.2.1, 6.3.1 y 6.4.2.

Por otro lado, se realizó una encuesta de percepción de la población residente en el área metropolitana de Panamá. Los resultados de la encuesta demuestran que la percepción de los encuestados es que aún quedan desafíos importantes dentro de las distintas metas del ODS 6 y la mayoría de los resultados discrepan de los resultados de avances publicados en el Reporte de Desarrollo Sostenible 2022 para Panamá. Se identificó una situación más crítica en términos de saneamiento e higiene.

Debido a que este estudio se basa en la percepción de las personas, puede que algunas metas estén más avanzadas, por lo que se insta a divulgar los programas y prácticas que se están implementando. A su vez, se recomienda mayor inclusión de los distintos grupos de la sociedad.

La importancia de este estudio radica por un lado en la inclusión de la opinión de las personas en el seguimiento de los ODS y por otro lado en que los resultados de este estudio son los únicos datos conocidos para algunos indicadores que no cuentan con información de avances.

Este estudio debe realizarse en otras regiones de Panamá. Por ejemplo, en zonas rurales y zonas con actividad agropecuaria donde las condiciones, los usos del agua y los potenciales impactos son diferentes.

Agradecimiento

Agradecemos el apoyo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) para esta investigación dentro de los proyectos PFID-INF-2020-48 “Morbilidad vs la calidad del agua para consumo humano en Tonosí: un estudio piloto” y PFID-FID-2021-103 “Estudio integrado de la demanda de agua potable para la optimización del diseño de los sistemas de acueductos en Panamá”.

Referencias

[1] Naciones Unidas, «Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015», 2015. [En línea]. Disponible en: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf

[2] Consejo de la Concertación Nacional para el Desarrollo, «Plan Estratégico Nacional con Visión de Estado ODS Panamá 2030», 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.pa.undp.org/content/panama/es/home/library/poverty/plan-estrategico-nacional-con-vision-de-estado-2030.html

[3] Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica 2016, «Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos. Panamá, República de Panamá». 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.pa.undp.org/content/panama/es/home/library/environment_energy/plna_seguridad_hidrica_agua_para_todos.html

[4] J. Sachs, G. Lafortune, C. Kroll, G. Fuller, y F. Woelm, «Sustainable Development Report 2022 From Crisis to Sustainable Development: the SDGs as Roadmap to 2030 and Beyond». 2022. [En línea]. Disponible en: https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2022/2022-sustainable-development-report.pdf

[5] Q. Wang y R. Huang, «The impact of COVID-19 pandemic on sustainable development goals – A survey», *Environmental Research*, vol. 202, p. 111637, nov. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111637.

[6] J. Shi, V. H. M. Visschers, y M. Siegrist, «Public Perception of Climate Change: The Importance of Knowledge and Cultural Worldviews», *Risk Analysis*, vol. 35, n.º 12, pp. 2183-2201, 2015, doi: 10.1111/risa.12406.

[7] G. Halkos y S. Matsiori, «Understanding the public’s perceptions of the importance, management, and conservation of biodiversity», *Economic Analysis and Policy*, vol. 75, pp. 262-270, sep. 2022, doi: 10.1016/j.eap.2022.05.013.

[8] S. A. González, D. Loyola, y K. Yañez-Navea, «Perception of environmental quality in a beach of high social segregation in northern Chile: Importance of social studies for beach conservation», *Ocean & Coastal Management*, vol. 207, p. 105619, jun. 2021, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105619.

[9] Instituto Nacional de Estadística y Censo, «Boletín 15. Estimaciones y proyecciones de la población en la república, provincia, comarca indígena por distrito, según sexo y edad: 2010-20». 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=499&ID_CATEGORIA=3&ID_SUBCATEGORIA=10

[10] R. H. Sampieri, C. F. Collado, y P. B. Lucio, *Metodología de la investigación*, vol. 3. McGraw-Hill, 2010. Accedido: 11 de marzo de 2019.

[11] D. A. Mora-Alvarado, «Comparative study of drinking-water coverage between Panama and Costa Rica», *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 31, n.º 4, pp. 84-96, dic. 2018, doi: 10.18845/tm.v31i4.3967.

[12] «Descripción del Programa – Programa Saneamiento de Panamá». https://saneamientodepanama.gob.pa/descripcion-del-programa/ (accedido 21 de julio de 2022).

[13] R. Singh, G. Andaluri, y V. C. Pandey, «Chapter 1 - Cities’ water pollution—Challenges and controls», en *Algae and Aquatic Macrophytes in Cities*, V. C. Pandey, Ed. Elsevier, 2022, pp. 3-22. doi: 10.1016/B978-0-12-824270-4.00015-8.

[14] S. Sauvé, S. Lamontagne, J. Dupras, y W. Stahel, «Circular economy of water: Tackling quantity, quality and footprint of water», *Environmental Development*, vol. 39, p. 100651, sep. 2021, doi: 10.1016/j.envdev.2021.100651.

[15] J. Bunsen, M. Berger, y M. Finkbeiner, «Planetary boundaries for water – A review», *Ecological Indicators*, vol. 121, p. 107022, feb. 2021, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107022.

[16] J. Lin, J. Huang, C. Prell, y B. A. Bryan, «Changes in supply and demand mediate the effects of land-use change on freshwater ecosystem services flows», *Science of The Total Environment*, vol. 763, p. 143012, abr. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143012.

Profile of Applicants Who Did Not Use the ALEKS Smart Tutor to Prepare for the Entrance Exam to the Technological University of Panama in 2018

Perfil de Aspirantes que No Utilizaron el Tutor Inteligente ALEKS como Preparación para la Prueba de Ingreso a la Universidad Tecnológica de Panamá en 2018

Javier E. Sanchez-Galan[a,b,*], Norma Miller[c], Giancarlo Roach-Rivas[d]
[a]Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales (FISC), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
[b]Sistema Nacional de Investigación (SNI), SENACYT, Panamá
[c]Facultad de Ciencias y Tecnologia (FCT), Universidad Tecnológica de Panamá
[d]Instituto de Estudios Nacionales (IDEN), Universidad de Panamá, Panamá
javier.sanchezgalan@utp.ac.pa norma.miller@utp.ac.pa, giancarloroach@gmail.com

***Abstract*— This paper presents the results of the analysis of the characteristics of the population of students who did not use the ALEKS intelligent tutoring system (ITS) before taking the PAA test to enter the Technological University of Panama in 2018. The population is described (N=9692) in terms of sociodemographic factors (sex, type of school, family income, province) and academic factors (High School Average, Average obtained in the PAA-mathematics test). Through the statistics, a profile is created of what we could classify as the average student who does not use the ALEKS platform. In addition, it is generally determined that there is a low but positive correlation between the average final score obtained at** secondary **school and what is obtained in the PAA test. The importance of this work is that a population not studied throughout the project is addressed and some ideas are left on how to monitor the university trajectory. In addition, it sheds light on the problem of low levels of mathematical sufficiency that applicants who aspire to enter the UTP have.**

Keywords— Sociodemographic analysis, Standardized Tests, Intelligent Tutoring Systems, University Trajectories.

***Resumen* — En este trabajo se presentan los resultados del análisis de las características de la población de estudiantes que No utilizaron el sistema tutor inteligente (STI) ALEKS antes de realizar la prueba PAA para ingresar a la Universidad Tecnológica de Panamá en 2018. Se describe a la población (N=9692) en términos de factores sociodemográficos (sexo, tipo de colegio, ingreso familiar, provincia) y académicos (Promedio de Secundaria, Promedio obtenido en la prueba PAA-matemáticas). A través de las estadísticas se crea un perfil de lo que podríamos catalogar como el estudiante promedio que No usó la plataforma ALEKS. Además, en general se determina que existe una correlación baja pero positiva entre el Promedio obtenido al finalizar la secundaria y lo que se obtiene en la prueba PAA. La importancia de este trabajo es que se aborda una población no estudiada a lo largo del proyecto y se dejan algunas ideas de como hacer el seguimiento de la trayectoria universitaria. Además, que se da luces sobre** la **problemática de los bajos niveles de suficiencia matemática que tienen los aspirantes de ingreso a la UTP.**

Palabras claves — Análisis sociodemográfico, Pruebas Estandarizadas, Sistemas tutores inteligentes, Trayectorias universitarias.

I. INTRODUCCIÓN

La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) fue creada mediante la Ley 18 del 13 de agosto de 1981 Sus raíces vienen de la Universidad de Panamá (UP), inicialmente en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, y posteriormente organizado como el Instituto Politécnico [1]. En la actualidad es una Universidad moderna con representación en casi todas las provincias del país a través de 7 Centros Regionales, donde ofrece 140 carreras profesionales desde niveles técnicos hasta doctorados.

En el último Ranking Universitario de QS Rankings, quedó en el grupo conformado por las #801 a 1000 Universidades a nivel mundial. Además, en las estadísticas a nivel latinoamericanas se posicionó en el #121 del Ranking [2]. Además de ser una de las primeras Universidades en ser acreditada por la Agencia Centroamericana de Acreditación de programas de Arquitectura e Ingeniería (ACAAI) [3].

Históricamente, la UTP estableció dos grupos de aspirantes, según las características y contenidos básicos de las pruebas de ingreso: los aspirantes a carreras técnicas y los aspirantes a las carreras de ingeniería.

En 2004 inició el uso de pruebas internacionales estandarizadas, con el propósito de medir la aptitud

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00056

académica y el aprovechamiento matemático de los nuevos aspirantes. Para este propósito se aplicó la Prueba de Aptitud Académica (PAA), la Prueba de Aprovechamiento en Matemática (PAM), y la prueba de inglés ELASH [4, 5].

Luego de dos años de aplicar las pruebas PAM, los datos recabados por el Sistema de Ingreso Universitario (SIU) evidenciaron que el porcentaje de aprobación era de aproximadamente el 35%. Debido a los bajos niveles de aprobación, se decidió descontinuar la aplicación del PAM.

Por otro lado, según The College Board [6], "*La PAA es una prueba que evalúa las habilidades y los conocimientos necesarios para hacer trabajo académico de nivel universitario. Desde sus inicios, este instrumento se ha desarrollado para predecir, junto con otros criterios, el éxito en el primer año de estudios superiores*".

La PAA es una prueba conformada por (Lectura, Redacción, Matemáticas e inglés). La prueba estandarizada PAA tiene un puntaje máximo de 1600 puntos. La UTP requiere al menos 900 puntos para el ingreso a las carreras técnicas y al menos 1000 puntos para las ingenierías. La ponderación refleja la débil preparación de los aspirantes, quienes obligatoriamente deben realizar el curso de verano, llamado "curso de refuerzo" [7].

Con la aplicación de las pruebas PAA, el porcentaje de aprobación alcanzó entre el 56% y 64%, o sea que, 6 de cada 10 aspirantes pasan las pruebas para de ingreso a la UTP. Sin embargo, un porcentaje significativo de los aspirantes muestra deficiencias al realizar la prueba, por lo que persiste la necesidad de estudiar la situación y formular alternativas que permitan mejorar el rendimiento de los aspirantes en las pruebas de ingreso.

En este contexto, en los últimos años, a través del Proyecto "Evaluación de un sistema tutor inteligente para determinar el nivel matemático de los estudiantes en proceso de admisión a la Universidad Tecnológica de Panamá y ofrecer nivelación personalizada" se propuso utilizar las tecnologías de la información (TIC), se propuso utilizar las tecnologías de la información, en específico el sistema de tutor inteligente (STI), Assessment and LEarning in Knowledge Spaces Placement, Preparation and Learning (en inglés, ALEKS PPL) [8] para contribuir al fortalecimiento de las capacidades de los aspirantes de ingreso a la UTP.

El Proyecto sirvió como estudio piloto para entender las deficiencias de los aspirantes, así como los determinantes del desempeño en el PAA y su relación con el uso de sistemas de tutores inteligentes [9].

Los resultados iniciales de este proyecto fueron presentados en el 7mo Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología (IESTEC) de la UTP, en forma de dos artículos científicos. En [10] se sugiere que el uso del STI contribuyó a reducir las diferencias en el desempeño observadas en la cohorte anterior de aspirantes. Además que el efecto del STI está correlacionado con el tiempo de interacción con la plataforma. Por su parte en [11], se encontraron resultados similares y se concluyó que el STI contribuye a reducir las diferencias y, por tanto, ayuda a mejorar el desempeño de los alumnos.

En este trabajo se abordará nuevamente los datos recolectados en el Proyecto, pero el objetivo es entender el perfil de los aspirantes que *No* usaron la plataforma ALEKS para reforzar su conocimiento matemático antes de presentar el PAA para ingresar a la Universidad Tecnológica de Panamá en 2018. Además, se pretende indagar sobre si el promedio escolar final puede explicar el resultado obtenido en la prueba PAA-matemáticas, como se ha realizado en otras latitudes [12, 13].

El resto de este artículo está estructurado de la siguiente manera: l a sección II, presenta los datos utilizados para el estudio y los métodos estadísticos para su análisis. La sección III, contiene los resultados obtenidos y hace un breve análisis de sus implicaciones. La sección IV presenta las conclusiones generales del artículo y propone trabajos futuros para profundizar el análisis de los datos.

II. METODOLOGIA

A. Datos Iniciales

Como se describe en [10], antes de realizar el PAA, a todos los aspirantes a ingresar a la UTP para el periodo 2019-2020, se les ofreció la posibilidad de utilizar el refuerzo en matemática a través de ALEKS. e modo que la muestra utilizada es auto seleccionada y no probabilística (no calculada por medio de fórmulas de muestra representativa).

El SIU de la UTP colectó la información de índole socio-demográfica y académica de todos los aspirantes. Este estudio consideró dicha información para analizar el No uso de la plataforma, con énfasis en las siguientes características:

- Sexo del aspirante (hombre, mujer)
- Tipo de colegio (particular/privado, oficial/publico)
- Ingreso Familiar, que se rige según la Tabla I.
- Provincia de Procedencia
- Promedio de Secundaria (1.0 a 5.0)
- Promedio en la Prueba PAA, sección de matemáticas (200 -800 puntos)

Tabla I
CATEGORIZACION DEL INGRESO FAMILIAR

Ingreso Familiar	Categorización
menos de B/.500.00	bajo
de B/.500.00 a B/.999.99	medio bajo
de B/.1000.00 a B/.1999.99	medio
de B/.2000.00 a B/.2999.99	medio alto
mas de B/.3000.00	alto

En la Figura 1 se muestra la proporción de los usuarios activos de la plataforma ALEKS (n=1245). En efecto, considerando que en 2018 hubo N=11528 postulaciones, casi el 11% de los aspirantes utilizó la plataforma; mientras que el 89% que no ingresó (n=9662) o se registró pero nunca utilizó la plataforma (n=591).

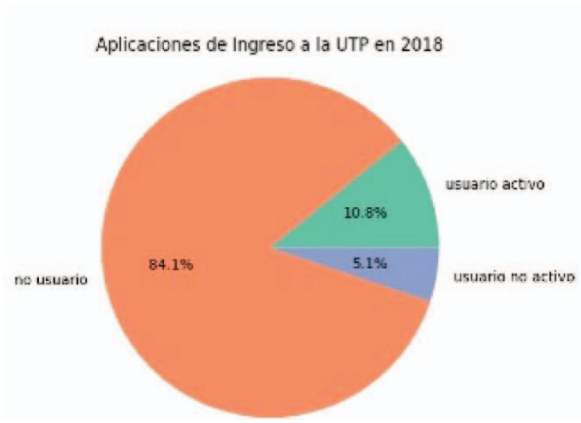


Fig. 1. Distribución de las Aplicaciones de Ingreso a la UTP en 2018

B. *Analisis Estadistico*

Para el análisis de los datos se utilizaron métodos estadísticos descriptivos. En la sección III se presentan tablas de contingencia, así como medidas de tendencia central y de posición de los datos. Además se utilizó el análisis de correlación para variables, dada por la ecuación 1:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

donde r_{xy} representa el coeficiente de correlación de la relación lineal entre las variables x e y. Además, x_i e y_i son los valores de la variable x e y para una muestra i. Finalmente, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ es el promedio de los valores de la variable x e y. También, se hizo un análisis de cuartiles para entender la relación entre el puntaje obtenido por los aspirantes y otras variables del estudio.

Los datos se analizaron con la librería Pandas y los gráficos se realizaron con la librería Matplotlib del lenguaje Python.

III. Resultados

A. *Descripcion de la Poblacion (Sexo y Tipo de colegio)*

La Tabla II muestra la distribución de los aspirantes que no usaron la plataforma por sexo del aspirante y por tipo de dependencia del colegio. Se distingue que la mayor parte de esta población son hombres (64%) y aunque el complemento de mujeres asciende al 36%. En general la mayoría vienen de colegio público (68%), con un complemento de 32% que vienen de colegio privado. También se distingue un subgrupo que hace casi el 25% (n=1656) dentro de los colegios públicos que proviene de Institutos de Profesionales y Técnicos (IPT).

Tabla II
Distribucion de los aspirantes por Sexo y por tipo Colegio

	Sexo		
	Hombres	**Mujeres**	**Total**
Participantes	6171	3521	9692
Colegio Publico	4277	2335	6612
Colegio Privado	1894	1186	3080

B. *Analisis de Ingreso Familiar y Provincia de Procedencia*

En la Figura 2 se muestra la clasificación por Ingreso Familiar. Se puede notar que un gran número, casi 2,500 aspirantes (26%) están en la categoría de ingreso familiar bajo. El mayor porcentaje de los aspirantes se encuentran en la categoría de ingreso familiar medio bajo y medio (59%). Un número reducido se encuentra en el rango de ingreso familiar medio alto o alto (14%).

Cuando se cruzan los valores de ingreso familiar con el tipo de colegio, como se muestra en la Tabla III, se puede notar que la gran mayoría de los estudiantes de ingreso familiar bajo están en colegio público. Además, como es de suponerse el complemento de estudiantes con ingresos familiares altos y que provienen de colegios públicos es bajo. Interesante notar que los estudiantes de colegio privado están bien distribuidos en todos los estratos de ingreso familiar, con la única excepción del rango de 1,000 a 1,499.99 donde están la mayoría de los estudiantes de colegios privados.

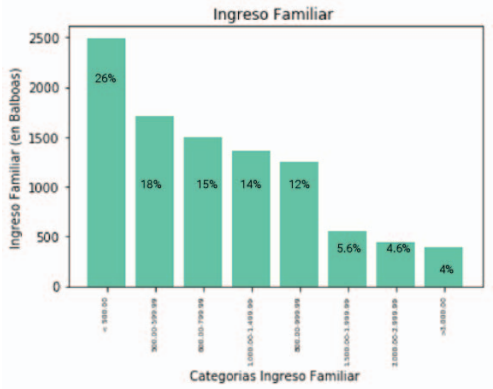


Fig. 2. Clasificación por Ingreso Familiar

Tabla III
Distribución del ingreso Familiar por Rango para estudiantes de Colegio Público y Privado

	Tipo de Colegio	
Ingreso Familiar	**Privado**	**Público**
≤ 499.99	327	2160
500 a 500.99	337	1369
600 a 799.99	369	1126
800 a 999.99	445	807
1,000 a 1,499.99	641	722
1,500 a 1,999.99	324	227
2,000 a 2,999.99	315	126
≥ 3,000	322	75

Al segregar los estudiantes por Provincia, como se ve en la Figura 3, nos damos que casi la mitad (46%) tienen intenciones de ingresar al Campus Central Dr. Víctor Levi Sasso, en ciudad de Panamá. Seguido de las provincias de Colón, Bocas del Toro, Veraguas y Coclé. Finalmente, los Centros Regionales de

Panamá Oeste, Chiriquí y Azuero, con menores porcentajes, quizás explicable ya que en este centro muchas carreras no están completas.

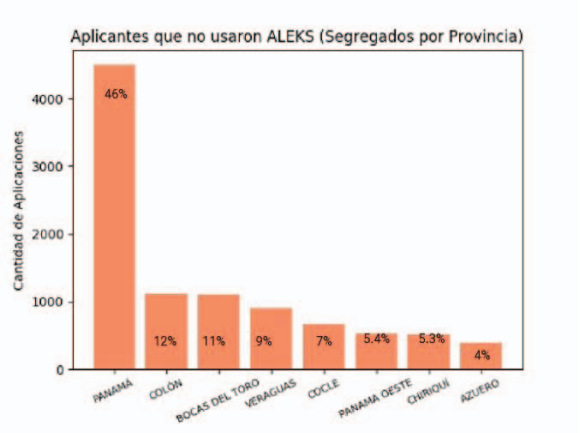


Fig. 3. Distribución de aspirantes por Provincia.

C. Analisis de Factores Academicos (Escolar y Examen PAA)

Con relación a los factores académicos en la Figura 4A se muestra la Distribución de Promedios obtenidos en secundaria, el grupo de frecuencia más alta son los estudiantes entre 3.5 a 4.0, se calculó un promedio μ=3.96 ± 0.53, lo que indica que los aspirantes están en general rondando el 80% o el 4.0de 5.0, como promedio de la escuela.

Cuando se segrega los promedios por tipo de Colegio, ver Figura 4B, se puede apreciar que hay una ligera ventaja para estudiantes que provienen de colegio privado μ_{pr}=4.04 ± 0.35, comparado contra el promedio de colegio público μ_{pu}=3.91 ± 0.32.

En términos de diferencia entre hombres y mujeres, ver Figura 4C, se observa que el promedio obtenido por las mujeres es superior que el de los hombres que los hombres con promedios de μ_m=4.06 ± 0.34 y μ_v=3.88 ± 0.32, respectivamente.

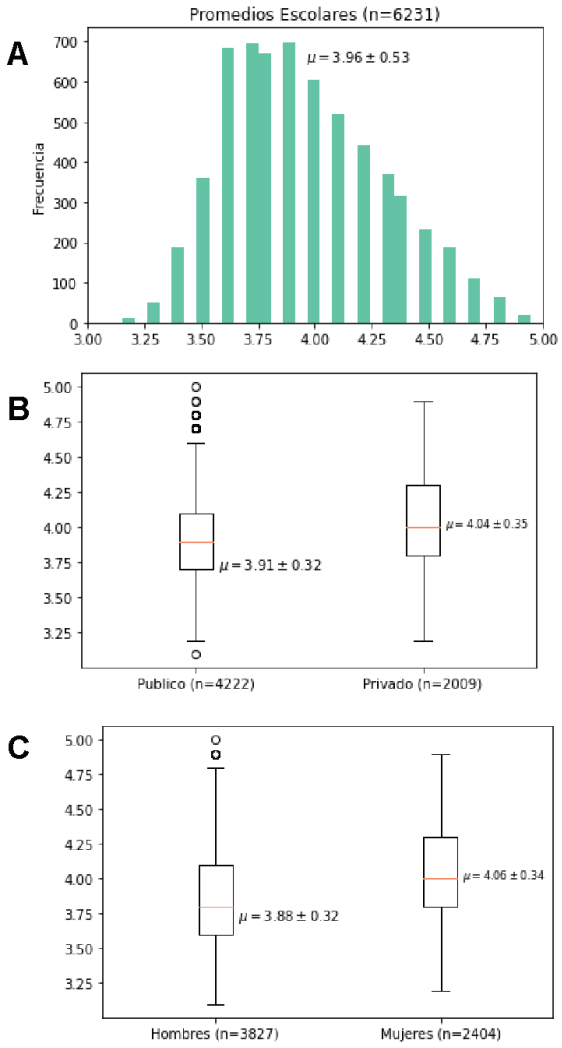


Fig. 4. Distribución de Promedios obtenidos en secundaria (A). Diagrama de caja donde se segrega los promedios por tipo de Colegio (B). Diagrama de caja donde se segrega los promedios por sexo (C).

Con relación a los factores académicos en la Figura 5A se muestra la Distribución de Promedios obtenidos en el PAA, el grupo de frecuencia más alta son los estudiantes entre 380 a 500. Se calculó un promedio μ=460 ± 102, lo que indica que los aspirantes están en general rondando el 50% a 70% totales de la prueba.

Cuando se segrega los promedios por tipo de Colegio, ver Figura 5B, se puede apreciar que hay una ventaja para estudiantes que provienen de colegio privado μ_{pr}=504 ± 115, comparado contra el promedio de los que vienen de un colegio público μ_{pu}=439 ± 87.

En términos de diferencia entre hombres y mujeres, ver Figura 5C, tenemos un efecto ligeramente inverso a la gráfica anterior de promedios escolares. Los hombres tienen

un mayor porcentaje en la prueba PAA μ_v=466 ± 103 con respecto a las mujeres μ_m=449 ± 98, respectivamente.

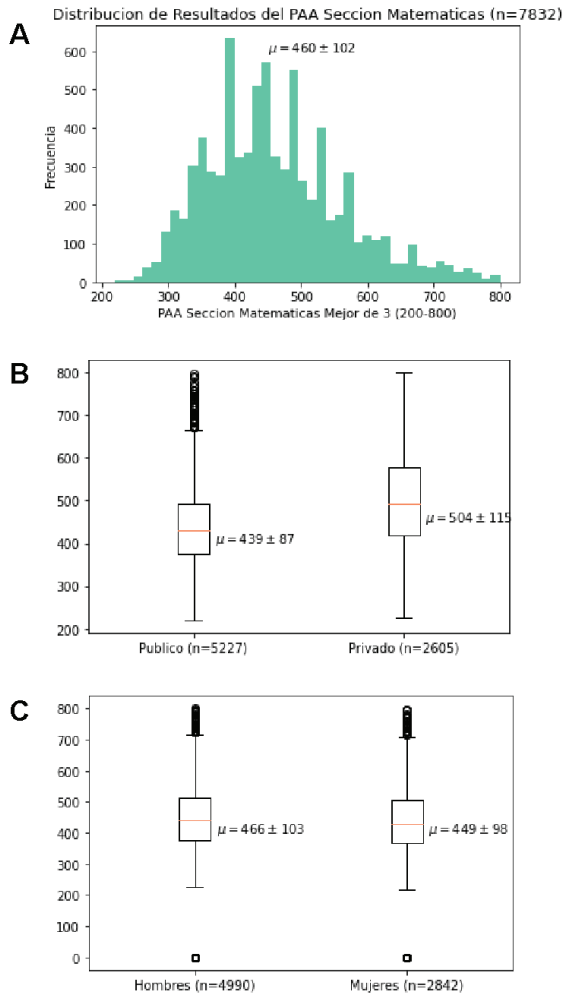


Fig. 5. Distribución de Promedios obtenidos en el PAA (A). Diagrama de caja donde se segrega los promedios del PAA por tipo de Colegio de procedencia(B). Diagrama de caja donde se segrega los promedios del PAA por sexo (C).

A través del análisis de correlación, se encontró una relación positiva pero débil entre el Puntaje Promedio del PAA y el Promedio Final Escolar (correlación lineal = 0.32), como se observa en la Figura 6.

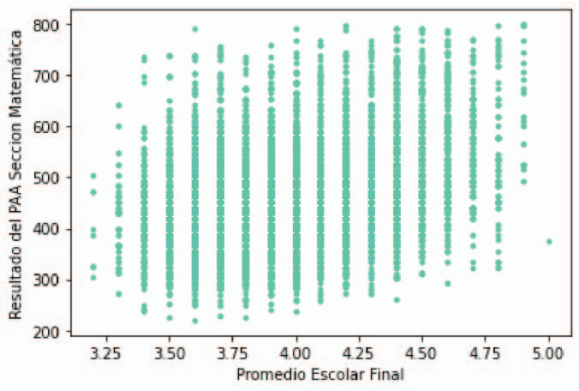


Fig. 6. Gráfica de Puntaje Promedio del PAA vs Promedio Final Escolar.

Lo que puede sugerir a primera vista que un mayor promedio Escolar mayor puntaje en el PAA-matemáticas. Aunque es realmente interesante que en muchos de los casos estudiantes que tienen promedios de 3.75 o superiores en el colegio logran obtener puntajes en el rango 750-800. Además, se puede notar que existen promedios bajos entre 400-600 para todos los promedios escolares sin distinción.

Por último, se relacionó el Puntaje Promedio del PAA-matemáticas con las principales variables del estudio, como se muestra en la Tabla IV.

En esta Tabla se describen dos variables binarias Tipo de colegio (público) y sexo (hombre) de forma activa. Por ende se podría calcular el valor correspondiente a las otras categorías por complemento, es decir 100-valor. Como ejemplo, se puede decir que para el primer Cuartil (Q1) el 77.8% de los estudiantes provenían de un colegio público y (100-77.8) 22.2% provenían de un colegio privado.

Tabla IV
CARACTERÍSTICAS SOCIOEDUCATIVAS DE LOS ASPIRANTES SEGÚN CUARTIL DEL PUNTAJE PAA-MATEMÁTICAS

Cuartil	Q1	Q1-Q2	Q2-Q3	Q4
Promedio de secundaria	3.9	3.9	4.0	4.1
Tipo de colegio (Publico = 1)	77.8%	75.3%	71.4%	46.0%
Sexo (Hombre = 1)	58.1%	60.2%	62.2%	65.5%
Ingreso familiar alto	1.6%	2.4%	3.0%	9.8%
Ingreso familiar bajo	30.9%	28.9%	25.2%	12.4%

Se encontró que los aspirantes en el primer cuartil del PAA-matemáticas (Q1 = 367), obtuvieron un promedio escolar por debajo de la mediana observada entre el total de aspirantes que no utilizaron la plataforma. Además, en este cuartil, se observó la mayor alta incidencia de aspirantes con ingresos familiares bajos (30.9%) y de aspirantes que completaron sus estudios secundarios en escuelas oficiales o públicas (77.8%). Sin embargo, los aspirantes en el Q3 (puntaje PAA-matemáticas = 514) se distinguen del resto en que presentaron el mayor puntaje escolar promedio, Además, contaron con la menor proporción de estudiantes de colegios oficiales (46.0%) y de ingresos bajos (12.4%). Por el contrario, en el grupo de aspirantes en el Q3 del puntaje PAA-matemáticas se observó la mayor participación de aspirantes que reportaron ingresos familiares altos (9.8%).

IV. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar los perfiles de aspirantes que *No* usaron la plataforma ALEKS para reforzar su conocimiento matemático antes de presentar el PAA para ingresar a la Universidad Tecnológica de Panamá en 2018. Se pone especial atención a variables socio-demográficas y académica s con el fin de entender cuáles factores influyen en el rendimiento en la prueba PAA de matemáticas.

Primero, encontramos que una parte importante de los estudiantes que no utilizaron la plataforma vienen de la Ciudad de Panamá (lastimosamente, los datos no permiten desagregar a un menor nivel) Además, la mayoría son hombres provenientes de colegios públicos con un Ingreso familiar bajo y con pesar un Promedios escolares cercano al 80%. En cuanto al puntaje en el PAA, se observó que el promedio fue de al rededor de 450 (de un máximo de 800 puntos), es decir que obtienen entre el 50% y 60% de respuestas correctas. Por otro lado, aunque se sugiere que existe una débil correlación positiva, n o encontramos evidencia concluyente del efecto del Promedio escolar en el desempeño en el PAA.

Adicionalmente, del análisis por cuartiles se infiere que en los cuartiles representativos de puntajes más bajos (Q1 y Q2), se encuentran la mayoría de estudiantes de colegios públicos y los ingresos familiares bajos. Mientras que los cuartiles representativos a puntajes más altos (Q3 y Q4) están asociados a la mayoría de estudiantes de colegios privados, con ingresos familiares altos.

Algunas limitantes de este trabajo es que no se cuenta con información de los motivos por lo s cuales los aspirantes no accedieron al Sistema tutor inteligente, ALEKS.

Como trabajos futuros se tiene planificado comparar los datos de los estudiantes que usaron ALEKS contra la población que aquí se describe. Ya que al comparar ambas poblaciones y sus resultados, se podría ampliar el estudio de los perfiles a través de segregación por análisis de varianza covarianza (ANCOVA). Además, se podría tomar como base para determinar para sugerir el uso obligatorio de la plataforma, mediante estrategias como la inscripción por defecto en la plataforma.

En ese sentido, de los usuarios de ALEKS se podrían obtener métricas para entender qué temas específicos hay que reforzar antes de hacer el examen, así como el análisis de las características del "buen" uso de la Plataforma (horario, provincia, estado económico).

En general este proyecto es piloto y abre la puerta al seguimiento universitario de estudiantes de la UTP. Por ejemplo, resulta de interés analizar la trayectoria universitaria de los estudiantes que No utilizaron la plataforma, con hincapié en su desempeño en cursos como Pre-cálculo, Cálculo 1, Cálculo 2, Cálculo 3, Ecuaciones Diferenciales y Matemáticas Superiores, en los cuales típicamente los estudiantes de ingeniería presentan problemas y deficiencias. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT) por su apoyo a través del proyecto "*Evaluación de un Sistema Tutor Inteligente para Determinar el Nivel Matemático de los Estudiantes en Proceso de Admisión a la Universidad Tecnológica de Panamá y Ofrecer Nivelación Personalizada.*". Los autores agradecen el apoyo brindado por el Sistema de Ingreso Universitario (SIU) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). J.E.S-G. es apoyado por el Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Panamá).

REFERENCES

[1] Y. Batista, "Antecedentes historicos de la universidad tecnologica depanama,"https://utp.ac.pa/antecedentes-historicos-de-la-universidad-te cnologica-de-panama, 2020, sitio visitado el 20/04/2021.

[2] QS Top University Rankings, "Universidad tecnologica de panamarankings," https://www.topuniversities.com/universities/universidad - tecnologica-de-panama-utp, 2021, sitio visitado el 1/08/2022.

[3] F. Cruz and M. Quintero, "Buenas practicas para la reduccion delabandono estudiantil en la carrera de licenciatura en ingenieria civil de la universidad tecnologica de panama," in*Congresos CLABES*, 2013.

[4] Sistema de Ingreso Univeritario UTP, "Admision universidad tecnologica de panama,"https://utp.ac.pa/introduccion-admision, 2021, sitio visitado el 20/04/2021.

[5] Direccion General de Planificacion Universitaria., "Memoria institucional 2018. universidad tecnologica de panama,"https://utp.ac.pa/documentos/2019/pdf/memoria 2018 pdf.pdf, 2018.

[6] The College Board, "¿que es la paa?"https://latam.collegeboard.org/p aa/que-es-la-paa/, 2021, sitio visitado el 20/04/2021.

[7] Sistema de Ingreso Univeritario UTP, "Proceso de admision para lascarreras de pregrado - universidad tecnologica de panama,"https://utp. ac.pa/proceso-de-admision-para-las-carreras-de-pregrado, 2021, sitio visitado el 20/04/2021.

[8] McGraw-Hill Higher Education, "What is aleks ppl?", https://www.mheducation.com/highered/aleks.html. 2021, sitio visitado el 12/10/2022.

[9] S. Dıaz, "Presentan proyecto de evaluacion de un sistema tutor inteligente para el area de matematicas,"https://elcapitalfinanciero.com/presentan-proyecto-de-evaluacion-de-un-sistema-tutor-inteligente-p ara-el-area-de-matematicas/, 2018, sitio visitado el 20/04/2021.

[10] N. L. Miller, J. E. Sanchez-Galan, and B. E. Fernandez, "Use of an intelligent tutoring system for mathematics by students who aspire to enter the technological university of panama," in *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*. IEEE, 2019, pp. 255–260.

[11] B. E. Fernandez and N. L. Miller, "Proposal to implement the precalcu-lus and basic mathematics courses using an intelligent tutoring system," in *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*. IEEE, 2019, pp. 290–295.

[12] P. L. Silva, L. C. Nunes, C. Seabra, A. Balcao Reis, and M. Alves, "Student selection and performance in higher education: admission exams vs. high school scores," *Education Economics*, vol. 28, no. 5, pp. 437–454, 2020.

[13] J. Armendriz, J. Tarango, and J. Machin-Mastromatteo, "Analysis of institutional competitiveness of junior high schools through the admission test to high school education," *Journal of New Approaches in Educational Research (NAER Journal)*, vol. 7, no. 1, pp. 52

Environmental management and ICT for sustainable development in universities

Gestión ambiental y TIC para el desarrollo sostenible en universidades

Patricia Alexandra Albuja Mariño
Department of Administrative Sciences
Universidad Tecnologica Israel
Quito, Ecuador
https://orcid.org/0000-0002-5033-7993

Paul Francisco Baldeon Egas
Department of Engineering Sciences
Universidad Tecnologica Israel
Quito, Ecuador
https://orcid.org/0000-0001-8939-8964

Henry Recalde
Department of Engineering Sciences
Universidad Tecnologica Israel
Quito, Ecuador
https://orcid.org/0000-0003-0768-4452

Renato Toasa
Department of Engineering Sciences
Universidad Tecnologica Israel
Quito, Ecuador
http://orcid.org/0000-0002-2138-300X

***Abstract*— The present research aims to establish the importance of applying education for sustainable development, through the incorporation of a transversal subject in third-level training with the support of ICT, which will allow all students to acquire the theoretical and practical knowledge necessary to promote responsible management of the environment.**

An exploratory-descriptive study was applied to diagnose the current situation of the University and its socio-environmental responsibility, it has a mixed approach by combining qualitative methods based on of environmental management as an instrument to promote sustainable university and quantitative development by relying on data from surveys carried out on 300 students of the Business Administration career as part of the hetero-evaluation, which allowed the analysis of the data.

The results showed that 96 , 66% consider active methods excellent of teaching-learning of the Environmental Management subject, 98.33% state that the activities and resources used in the Virtual Learning Environment are excellent and 97% stated that there is articulation of the theoretical contents and their practical and professional application, which confirms the importance of promoting sustainability associated with environmental management activities in Universities.

Keywords*— *environmental management, ICT, university, sustainable development

***Resumen* — La presente investigación tuvo por objetivo establecer la importancia de aplicar la educación para el desarrollo sostenible, a través de la incorporación de una asignatura de tipo transversal en la formación de tercer nivel con el apoyo de las TIC, lo cual permitió que todos los estudiantes adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover la gestión responsable del ambiente.**

Se aplicó un estudio de tipo exploratorio-descriptivo al diagnosticar la situación actual de la Universidad y su responsabilidad socio ambiental , se utilizó un enfoque mixto al combinar métodos cualitativos en función de la gestión ambiental como un instrumento para promover el desarrollo sostenible universitario y cuantitativos al apoyarse con datos de encuestas realizadas a 300 estudiantes de la carrera Administración de Empresas como parte de la heteroevaluación, los cuales permitieron el análisis de los datos.

Los resultados demostraron que un 96,66 % consideran como excelentes los métodos activos de enseñanza-aprendizaje de la asignatura Gestión Ambiental, el 98,33% manifiesta que las actividades y recursos utilizados en el Entorno Virtual de Aprendizaje son excelentes y 97% manifestó que existe articulación de los contenidos teóricos y su aplicación práctica y profesional, lo cual ratifica la importancia de promover la sostenibilidad asociada a las actividades de gestión del ambiente en Universidades.

Palabras claves — gestión ambiental, tic, universidad, desarrollo sostenible

I. INTRODUCTION

The activities carried out by human beings in order to develop themselves generate diverse impacts, many of which negatively affect the environment; there is pressure on natural resources which causes an imbalance in ecosystems [1].

In the case of Universities, the academic and administrative activities that are developed, generate impacts, with respect to this issue, it states that for several years, the importance of higher education in contributing to the solution of many global problems has been identified, for which it is necessary to strengthen the areas of management, education and environmental participation in the institutions [2].

It is precisely as a social response that Environmental Management arises, which is defined as the set of actions aimed at achieving the maximum rationality in the decision-making process related to the conservation, defense, protection and improvement of the environment for which certain activities should be carried out leading to the achievement of environmental objectives [3].

There are several studies related to Environmental Management in Universities, among them, the inclusion of environmental issues in areas that include, in addition to the substantive functions of teaching, research and extension, institutional policies and participation, management and environmental planning in Colombian Higher Education

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00057

Institutions [3]. Ecuador also seeks to strengthen environmental culture and conservation, which is why the Ministry of Environment established the National Environmental Education Strategy for Sustainable Development 2017-2030 that includes Higher Education Institutions with the line of action: "Inclusion of the environmental approach in Higher Education, in consensus with the country's Educational Institutions and higher education and environmental governing bodies", precisely the need to reduce pressure on the environment and contribute to the improvement of environmental quality and consequently improve the quality of life [4].

The major global concerns are embodied in the Sustainable Development Goals of the United Nations (see fig. 1), which have been adopted by more than 190 countries in the Global Agenda for Sustainable Development, these countries have redesigned their agendas to support their fulfillment. The global agenda is undoubtedly oriented towards the constant search for growth and reduction of inequality, greater access to health, education, environment, use of ICTs, etc., as well as to the development of a sustainable development strategy [5].

The characteristics of Sustainable Development are determined by maintaining the quality of life, allowing continued access to natural resources, preventing further damage to the environment and causing a reorientation of productive and clean technologie [6].

Figure 1. Sustainable Development Goals (SDG) (Source: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda)

With the approval of the 2030 Agenda for Sustainable Development, the E 2030: Education to Transform Lives campaign was launched at the regional level, defining goals and strategies for the fulfillment of Goal 4 Quality Education: Ensure inclusive, equitable and quality education, promoting lifelong learning. [7].

The academy has much to see and propose in relation to the sustainable development goals with the way in which education can contribute to each of them. Therefore, the achievement of quality education is the basis for improving people's lives and sustainable development, and there has undoubtedly been significant progress in improving access to education at all levels and increasing school enrollment rates, although it is necessary to redouble efforts to achieve greater progress in achieving the goals of universal education [8]. Based on the mentioned above, the educational model of UISRAEL is presented (see fig. 2), which is based on student-based learning within which it is very important to incorporate environmental management in the various academic activities.

The use of new information and communication technologies has taken over many aspects of daily life and, like a mighty river, they sometimes tend to flow out of its channel and in fact what is produced is a crossing effect, that is to say, they enter practically every space of professional praxis and personal life [9].

As a fundamental aspect towards which Universidad Israel projects itself within the pedagogical resources, is the adoption of new technologies in higher education, among which we can mention progress in the culture of change and innovation, growth of the focus on the measurement of learning, expansion of open educational resources and the development of the inverted classroom (Flipped Classroom) defined as a didactic strategy, characterized by a teaching method that has changed the traditional model of learning, brings greater emphasis to the practice of teaching and learning [10].

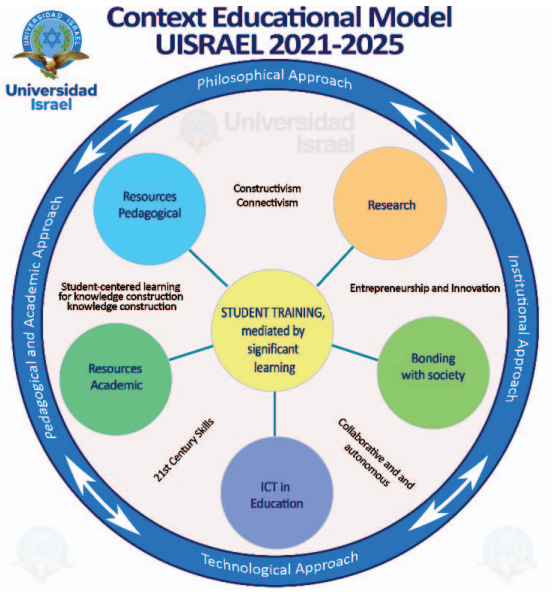


Figure 2. Context Educational Model UISRAEL 2021-2025 [11]

The role of education for sustainable development is therefore to contribute to making all this possible. Education and training are determining factors for an increase in creativity, rationality, problem solving and for the demands imposed by the complex cultural, social and technological decisions brought about by sustainable development.

The new education must face two great challenges in order to achieve these goals: to design strategies and programs that

consider all the actors susceptible to training -the state, families, companies, the media, international organizations and others-, and all the available channels of communication -schools, NGOs, civil society, the media and others- and to raise the quality of the educational and training process, especially with regard to citizens, economic sectors and young people. The driving force of sustainable development resides in an education that promotes integral growth for an informed and committed citizen [12].

As a function of this comprehensive training, the Universidad Israel (mentioned as UISRAEL) develops various activities related to environmental management on campus, one of them is to have taken into account global trends and include within the curriculum of studies in the Business Administration career, the subject Environmental Management in order to promote the fulfillment of sustainability that represents the objective 5 of the Institutional Strategic Planning [13].

II. DEVELOPMENT

A. Method

The methodological design is based on an exploratory-descriptive study because it diagnoses and analyzes the current situation of the University and its socio-environmental responsibility, has a mixed approach by combining qualitative methods to describe the academic aspects in terms of environmental management as an instrument to promote sustainable university development and quantitative methods by relying on data from surveys conducted to students as part of the heteroevaluation, which allow the analysis of the data obtained.

Two research modalities were used: bibliographic and applied through the analysis of the questionnaires sent to the students to evaluate the subjects, taking as reference the students of the Business Administration career period 2020-2021 (300 students).

The research was carried out at the Universidad Israel located in Ecuador, province of Pichincha, canton Quito, city of Quito.

B. Results

Taking into account the current regulations for the presentation of designs and redesigns of careers, in addition to the fact that the economic and social development of the country demands efficient companies with sustainable productivity, it requires highly prepared professionals to face the challenges that impact with their knowledge and work ethic to improve the quality of life of society, which is why UISRAEL has taken into account for the academic offer the studies of relevance and occupational demand, related to the National Development Plan and Sustainable Development Goals (see Table I).

Due to the importance of sustainability to achieve a balance in the activities of UISRAEL, it takes into consideration the objectives and incorporates them in the Strategic Plan for Institutional Development PEDI 2018-2022.

TABLE I. RELATION BETWEEN SUSTAINABLE DEVELOPMENT OBJECTIVES AND UISRAEL STRATEGIC OBJECTIVES

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OBJECTIVE	UISRAEL STRATEGIC OBJECTIVE
"Universal access to quality higher education" [4].	**Substantive Function:** Teaching **Objective 1.** Strengthen the learning process at UISRAEL *Generation of the most adequate conditions to improve the quality of the formative process of the students, which is reflected in the learning results.*
"Stimulating sustainable economic growth, productivity and technological innovation, entrepreneurship and job creation" [4].	**Substantive Function:** Research **Objective 2.** Strengthen research and scientific production in the institution, according to the defined lines of research. *Improvement of the research capacity of the institution's teaching staff and of the properly organized scientific production*
"Efficient management of shared natural resources and the way they are disposed of, industries, businesses and consumers must recycle and reduce waste"(ONU 2020).	**Substantive Function:** Liaison **Objective 3.** Strengthen the linkage with society in the university, according to the defined lines. *Relationship with society to contribute to the solution of its problems and needs, through the application of acquired knowledge and/or research.*
"Efforts to integrate disaster risk reduction measures into national policies and strategies" [4].	
"Investment in infrastructure and innovation are key drivers of economic growth and development" [4].	**Substantive Function:** Management **Objective 4.** Improve the quality of the institution's administrative performance. *Establish and implement a program to strengthen UISRAEL's physical and technological infrastructure.*

"Revitalizing the global partnership for sustainable development" [4].	**Substantive Functions:** Teaching/Research/Society Outreach **Objective 5.** Strengthen integrated management for sustainable development at UISRAEL. *"Development of a process to include the (SDGs) as a cross-cutting theme in the functions of teaching, research and social outreach*" [14].

Source: UISRAEL's Strategic Plan for Institutional Development PEDI 2018-2022. https://uisrael.edu.ec/inicio/nosotros/planificacion-institucional

Taking into account that one of the objectives of Environmental Management is the achievement of sustainability, it was decided to incorporate this subject in 2014 as part of the Curriculum (see fig. 3) in the Business Administration career in order to achieve the declared graduate profile which is:

To train professionals capable of understanding the dynamics of organizations and their interaction with the environment. These professionals are able to identify opportunities, establish objectives and execute strategic actions, through business management, to improve the productivity, competitiveness and sustainability of organizations [11].

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
MALLA ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS -MODALIDAD SEMIPRESENCIAL

UNIDAD BÁSICA					UNIDAD PROFESIONAL			TITULACIÓN
1er. NIVEL	2do. NIVEL	3er. NIVEL	4to. NIVEL	5to. NIVEL	6to. NIVEL	7mo. NIVEL	8vo. NIVEL	9no. NIVEL
Lectura Crítica	Contabilidad General	Desarrollo del Pensamiento y Creatividad	Comunicación y Organización Digital	Contabilidad de Costos	Presupuestos	Análisis Financiero	Administración Financiera	Auditoria Administrativa y de Gestión
160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas
Aplcación de las TIC	Redacción Científica	Fundamentos de Administración y Marketing	Arte y Cultura	Gestión Empresarial	Planificación Estrategica y Operativa	Administración de Recursos Humanos	Administración de Riesgos y Seguros	Administración de Empresas Productivas y de servicios
160 horas	160 horas	160 horas	80 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas
Análisis del Entorno Nacional e Internacional	Ética y Responsabilidad Social	Economía y Sociedad	Microeconomía	Legislación Empresarial	Análisis de Procesos	Legislación Laboral y Tributaria	Simulación de Negocios	Administración Pública
80 horas	80 horas	80 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas
Metodología de la Investigación	Emprendimiento e Innovación	Matemática Financiera	Formulación y Ejecución de Proyectos	Investigación de Mercados	Marketing Estratégico	Gestión de la Calidad	Gestión de la Producción y Operaciones	
160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	
Matemática Básica	Estadística Descriptiva	Estadística Inferencial	Matemática para Administración	Investigación Operativa	Control de Costos	Gestión Ambiental	Comercio Internacional	
160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	160 horas	

Figure 3. Summary outline of the Business Administration Curriculum

In the figure you can see the subjects that are part of the Administration career within which Environmental Management is at 7th level with a number of 160 hours as part of the professional Unit that goes from 6th to 8th level.

The Environmental Management subject is organized based on 4 general topics that range from the generalities and beginnings of environmental management to its evolution over time to reach instruments such as environmental impact assessment, management system, sustainable development and good practices. activities, the activities are developed in the physical and virtual classroom with the use of ICT and an active participation of the students is promoted both in class and in the development of the learning activities that are included in each of the content blocks.

Case studies are carried out with material that is available in the virtual classroom of the course. Group work is fundamental, both for in-class and out-of-class activities. This system is used for the introduction of topics, practical application with problem solving and case studies (see Table II).

TABLE II. PLANNING OF THE LEARNING ACTIVITIES SYSTEM

THEME	LEARNING ACHIEVEMENTS
1.1 Environmental problems, beginnings and evolution, characteristics, principles and objectives of Environmental Management	Interprets the characteristics and principles of environmental management. Analyzes the strengths, weaknesses and opportunities to apply environmental management
2.1 Environmental Impact Assessment: Cause and Effect Matrices	Evaluation of environmental impacts through the use of cause-effect matrix.
3.1 Environmental Management System and ISO 14001 Standards	Application of the elements that make up the ISO 14000 Environmental Management System.
4.1 Environmental management and sustainable development	Determination of the direct relationship between environmental management and sustainability (sustainability axes).
4.2 Good environmental practices	Analysis of business, social and environmental aspects within good environmental practices

As part of the development of the subject there are various activities and tasks that students perform in order to meet the objective of the subject, which is to apply environmental management instruments for the sustainable management of companies. Web tools are used in class. that support innovation and dynamism to capture the attention and promote the participation of students

Below are the activities that students must complete as part of the proposed learning outcomes (see Table III).

TABLE III. PRINCIPAL TASKS OF ESTUDENTS

THEME	LEARNING ACHIEVEMENTS
1.1 Environmental problems, beginnings and evolution, characteristics, principles and objectives of Environmental Management	Elaborate a conceptual map on the principles of environmental management that are fulfilled in a company.
2.1 Environmental Impact Assessment: Cause and Effect Matrices	Structure a matrix for the evaluation and interpretation of Environmental Impacts based on a proposed business project
3.1 Environmental Management System and ISO 14001 Standards	Carry out an essay using Turnitin on Benefits in application of the ISO 14001 Standard for Environmental Management Systems in companies
4.1 Environmental management and sustainable development 4.2 Good environmental practices	Make a video on good environmental practices related to the Sustainable Development Goals that are met at the business level. Make the presentation of an object made of recycled material explaining the 4R technique used

The Environmental Management class is taught with 4 hours a week in which dynamic presentations are used, in addition to lessons with the use of tools such as kahoot, mentimeter, and others, activities are carried out in groups, workshops, all of which allows to generate an environment cordial in which the environmental issue is debated and contributed based on the personal experience of each student and the strategies that will allow them to contribute to the care of the environment.

In addition, it is always sought to associate the contents of environmental management with the other subjects that they receive at the level, such as quality management and human resource administration.

At the University there is a recycling project, within which Business Administration students become active participants supporting the recycling campaigns that are organized every semester leading the process, they undoubtedly understand that resources are saved with proper waste management and management for this reason the activity of presenting a recycled object is always successful because we all have an object made of recycled material at home, and it is satisfactory to show how it was made, what materials were used and the current use that is given.

In each academic period, a heteroevaluation is carried out by all students (see Table IV). Three of the 10 questions asked to the students have been taken as a reference in order to present their opinions regarding the contents and application of the Environmental Management course with the support of ICT in the Virtual Learning Environment (EVA) Moodle.

TABLE IV. RESULTS OF HETEROEVALUATION - SUBJECT ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

EQUIVALENCE	The active teaching-learning methods used by the teacher to think, reflect, issue criteria and solve problems are as follows:	The activities and resources used in the Virtual Learning Environment are as follows:	The articulation of the theoretical contents and their practical and professional application is considered to be:
Excellent (100-90)	96,66	98,33	97
Very good (89-70)	3,34	1,66	3
Good (less than 70)	0	0	0
Total	**100**	**100**	**100**

The results show satisfaction with the existence, methodology and topics corresponding to Environmental Management, as well as the students' belonging and commitment, as evidenced by the high level of compliance with activities and tasks, as well as class participation in workshops, debates and practical activities related to environmental management at the University.

Additionally, in order to incorporate all students of the different careers in the path of sustainable development is created in 2017 the Program for the improvement of environmental culture from UISRAEL to society and develops the Institutional Project of Linkage with Society called "I Recycle", whose main objective is to promote in the UISRAEL community a culture of environmental care

through recycling, with the implementation of good environmental practices for the conservation of natural resources.

III. DISCUSSION

- Sustainable Development and its integration in Education has been dealt with by several authors who address the issue of Environmental Education in Higher Education as an essential competence in the training of future professionals and to achieve in them an environmental awareness encouraging commitment to contribute to social, cultural and economic change through values, attitudes and skills and to achieve the major objectives necessary for sustainable development [15]. In relation to this topic, environmental education is considered of great importance and Environmental Education is precisely one of the Best Practices that are addressed within the Environmental Management subject, which was conceived within the Business Administration curriculum [16].
- In relation to ICTs, they conducted a research on ICTs and their relationship with sustainable development, alluding to environmental problems and the contribution of ICTs in saving resources", precisely this criterion is shared because through ICTs you can access, for example, a virtual library, avoiding the consumption of paper copies, technology certainly contributes to the objectives of sustainable development by allowing research and be at the forefront of new methodologies and advances for environmental conservation and resources, also allows the dissemination of alternatives for environmental responsibility [17].
- The support of ICT was essential, which allows various activities to be carried out with the use of web tools that make it possible to dynamize the class and interact with students. Among the activities supported by ICT are the calculation of the environmental footprint, lessons using kahoot, mentimeter among others, in addition, each student makes a video on good environmental practices related to the Sustainable Development Goals that are met at the business level, resulting in an activity that generates excellent results by making the student the protagonist of a critical analysis based on of the environment, associated risks and environmental practices at a business, social and cultural level, which allows the reinforcement of theoretical content with practical application through activities that contribute to sustainability, students demonstrate a positive response and greater commitment by having subjects that support environmental responsibility and quality education to achieve sustainable development.
- The achievement of quality education is the basis for improving people's lives and sustainable development, therefore the results achieved in the student surveys confirm the acceptance of environmental management and active teaching-learning methods used by the teacher to think, reflect, issue criteria and solve problems with a rating of excellent in 96.66%, precisely this criterion reinforces the fulfillment of SDG 4: Quality education established in the 2030 Agenda [8].
- Universidad Israel supports the process of formation of the student in interaction with nature and society, through social practice. Education is assumed as a complex social process that responds to social needs, where the student is transformed and assimilates the cultural heritage from the activity and communication with other subjects; therefore, the socio-cultural context is valued of great importance in the formation of the student; it takes into account not only the scenarios of the classroom or virtual classroom for educational influences, but the entire university and social context [11].
- The students show great participation and sensitivity in issues related to the environment, therefore the topics addressed are supported by current events with analysis by the students and without a doubt the most rewarding part is to see how they are reinforcing that sense of environmental awareness that supports sustainable development.

IV. CONCLUSIONS

The research established the importance of adequately applying education for sustainable development within which the role of Higher Education Institutions is fundamental, resulting in the incorporation of a transversal type subject which is within the curriculum of the university. Business Administration career in the group of subjects of the Professional Unit allowing students to interpret and apply environmental management instruments based on current legislation to include them in the design of business projects that promote impact assessment and the use of good environmental practices in correspondence with sustainable development, being a subject that studies the environment generates motivation, interest, active participation of students who see an opportunity in addition to contributing to the environment, to generate added value to companies, which is one of the the topics you are looking for ar the 2030 Agenda through the SDGs, within the development of the subject the use of ICT is very important to facilitate the teaching-learning process with the possibility of using various innovative resources that allow the active participation of students who demonstrate a response positive and greater commitment by having subjects that support environmental culture and quality education to achieve sustainable development that is a responsibility of all humanity.

REFERENCES

[1] R. Domínguez, M. León, J. Samaniego, y O. Sunkel, “Desarrollo Sostenible”, Cepal.org. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/1/S1900378_es.pdf. [Consultado: 01-ago-2022].

[2] M. M. Callejas-Restrepo, O. Sáenz-Zapata, Á. M. Plata-Rangel, M. T. Holguín-Aguirre, y W. M. Mora-Penagos, “El compromiso ambiental de instituciones de educación superior en Colombia”, Prax. saber, vol. 9, núm. 21, pp. 197–220, 2018.

[3] P. C. Costilla Castillo, M. C. Bohórquez Flores, C. del R. Anampi Atapaucar, y E. N. Aguilar Calero, “Gestión ambiental en las

organizaciones: análisis desde los costos ambientales", Rev. venez. gerenc., vol. 23, núm. 84, 2018.

[4] M. J. Gamez, "Objetivos y metas de desarrollo sostenible", Desarrollo Sostenible, 17-sep-2015. [En línea]. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible. [Consultado: 01-ago-2022].

[5] O. de Naciones Unidas, "Organización de Naciones Unidas", Objetivos de Desarrollo Sostenible, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/. [Consultado: 01-ago-2022].

[6] R. Pérez Martell, Los objetivos de desarrollo sostenible. 2019.

[7] UNESCO, "Educación 2030 Declaración de Incheon Hacia una educación inclusiva y equitativa de calidad y un aprendizaje a lo largo de la vida para todos", Unesco.org, 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Santiago/pdf/ESP-Marco-de-Accion-E2030-aprobado.pdf. [Consultado: 01-ago-2022].

[8] A. Bárcena, Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. 2019.

[9] R. Pérez, La tecnología y los objetivos de desarrollo sostenible. 2020.

[10] M. Vidal Ledo, N. Rivera Michelena, N. Nolla Cao, I. del R. Morales Suárez, y M. N. Vialart Vidal, "Aula invertida, nueva estrategia didáctica", Educ. médica super. (Impresa), vol. 30, núm. 3, pp. 678–688, 2016.

[11] Universidad Israel, "Modelo Educativo", Modelo Educativo UISRAEL, 2020. [En línea]. Disponible en: https://uisrael.edu.ec/wp-content/uploads/2019/10/Modelo_Educativo_UISRAEL_2016_2020-1-min.pdf?x23864. [Consultado: 01-ago-2022].

[12] L. Chesney, Educación ambiental y desarrollo sustentable. Universidad Central de Venezuela, 2012.

[13] UNESCO, "Recursos Educativos Abiertos", Unesco.org. [En línea]. Disponible en: https://es.unesco.org/themes/tic-educacion/rea. [Consultado: 01-ago-2022].

[14] Universidad Israel, "Planificación Institucional", UISRAEL, 29-ago-2016. [En línea]. Disponible en: https://uisrael.edu.ec/inicio/nosotros/planificacion-institucional/. [Consultado: 01-ago-2022].

[15] M. E. Peñafiel Pazmiño y A. B. Vallejo López, "Educación ambiental en las universidades, retos y desafíos ambientales", Desarrollo Local Sostenible, núm. octubre, 2018.

[16] L. Ruiz Moreno, "La gestión ambiental en los procesos de resignificación de la existencia", Tóp. semin., núm. 39, pp. 37–64, 2018.

[17] J. M. Ibujés Villacís y A. Franco Crespo, "Uso de las TIC y relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Ecuador", Retos, vol. 9, núm. 17, pp. 37–53, 2019.

Impact of the use of Virtual SEDI Platform in the Reeducation of Children with Dyslexia in a Primary Educational Center

Impacto del uso de la Plataforma Virtual SEDI en la reeducación de niños disléxicos en un centro educativo primario

María Díaz-Quintero*
Dirección Nacional de Innovación y Tecnología Educativa
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
maria.diaz2@utp.ac.pa
ORCID:0000-0001-8449-6733

Kexy Rodríguez-Martínez
Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
kexy.rodriguez@utp.ac.pa
ORCID:0000-0002-3399-0632

Natividad Quintero-Fuentes
Centro Interdisciplinario de Atención e Intervención en Educación y Salud
Universidad Especializada de las Américas
Santiago, Panamá
natividad.quintero.5@udelas.ac.pa
ORCID:0000-0003-4116-3407

***Abstract*— This article presents the result of an investigation on the impact of the Educational Software for Dyslexia (SEDI) platform. It was designed based on the analysis of the traditional process carried out by specialists in learning difficulties (DIFA) in Panama, to achieve the reeducation of the difficulties presented by children with dyslexia. The study was conducted in a primary school located in the province of Veraguas in Panama, with the objective of evaluating the impact on the development of re-educational activities within the SEDI platform. For this purpose, a sample of 14 students was taken, of which 7 were from the control group and 7 were from the experimental group. The results of this research will greatly contribute to the improvement of the software product that directly and indirectly benefits specialists in learning difficulties, grade teachers, parents, non-dyslexic children, and students of Psychology, Speech Therapy, and Education with an emphasis on Learning Difficulties.**

Keywords— Educational software, dyslexia, reeducation, virtual platform, SEDI.

Resumen **—** Este artículo presenta el resultado de una investigación sobre el impacto de la plataforma de Software Educativo para la Dislexia (SEDI). El mismo fue diseñado basándose en el análisis del proceso tradicional que realizan los especialistas en dificultad en el aprendizaje (DIFA) en Panamá, para lograr la reeducación de las dificultades que presentan los niños y niñas con dislexia. El estudio fue realizado en un centro educativo primario, ubicado en la provincia de Veraguas en Panamá, con el objetivo de evaluar el impacto en el desarrollo de las actividades reeducativas dentro de la plataforma SEDI. Para esto se tomó una muestra de 14 estudiantes, los cuales 7 fueron del grupo control y 7 del grupo experimental. Los resultados de esta investigación aportarán grandemente a la mejora del producto de software que beneficia directa e indirectamente a los especialistas en dificultades en el aprendizaje, docentes de grado, padres de familia, niños y niñas no disléxicos y estudiantes de las Licenciaturas en Psicología, Fonoaudiología y en Educación con énfasis en Dificultades en el Aprendizaje.

Palabras claves —Software educativo, dislexia, reeducación, impacto, plataforma virtual, SEDI.

I. Introducción

La dislexia es un trastorno específico del aprendizaje que afecta aproximadamente el 5% al 10% de la población mundial [1], este término se utiliza para las dificultades en el aprendizaje de la lectura y escritura, se caracteriza por los problemas en la fluidez, descodificación de las palabras, comprensión de ideas y dificultad para seguir secuencias [2]; además, de otras deficiencias que afectan el desarrollo académico y personal de las personas. Esto ocasiona una serie de efectos colaterales, como: calificaciones bajas, desinterés en estudiar, baja autoestima, dificultad para aprender nuevos idiomas, ansiedad, entre otros [3], por esta razón, los niños con dificultades de aprendizaje requieren de otras actividades, aparte de las dictadas en las aulas de clases para desarrollar sus habilidades de escritura y lectura, así como sus conocimientos generales. Estudios desarrollados en la Ciudad de Panamá, muestra una relación del fracaso escolar con el trastorno específico del aprendizaje de la lectura [4] .

En Panamá, el tratamiento que se imparte en los centros especializados mayormente se ofrece a través técnicas de reeducación tradicionales, donde se hace uso de materiales convencionales a través de libros, fotocopias, folletos, guías, láminas, murales, carteles, ilustraciones, tableros, cartulina, goma, papeles especiales, cuadernos, bolígrafos, lápices de colores, carpetas, entre otros materiales que el especialista necesite para las actividades reeducativas [5].

Por otro lado, es evidente que el desarrollo de las tecnologías de información y comunicación (TIC) ha provocado que se realicen cambios en el proceso de enseñanza-aprendizaje, creando nuevos escenarios de formación. Con la integración de las TIC, se transforma en un proceso que va más allá de las herramientas tecnológicas en el ambiente educativo, se trata del desarrollo didáctico, la forma que se construyen y consolidan en un aprendizaje significativo, donde se mantiene la relación con la pedagogía [6].

Actualmente, la pedagogía es aceptada como la encargada de establecer la estructura de educación más conveniente para

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00058

lograr su objetivo, además de establecer "las líneas de pensamientos" que permiten evaluar, analizar y sintetizar los resultados para revisar y cuestionar las tareas y objetivos de la educación [7]. Los usos pedagógicos de las TIC para fines educativos crean nuevas dimensiones en los procesos de enseñanza-aprendizaje, esto se debe a la gran cantidad de información que ofrecen para la manipulación del usuario, flexibilidad en los procesos de instrucciones para adecuarlos a las necesidades de cada estudiante, promueve la motivación a través de las facilidades para presentar la información. Además, elimina las limitaciones y distancias geográficas entre los docentes y estudiantes; ofreciendo importantes beneficios educativos y culturales [8].

En este sentido, en el año 2014, se desarrolló una plataforma tecnológica llamada; SEDI (Software Educativo para la Dislexia), financiado por el estado panameño a través de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), con el objetivo de dar apoyo al tratamiento de la dislexia en niños y niñas de 7 a 10 años en Panamá. Este proyecto se desarrolló en colaboración entre la Universidad Tecnológica de Panamá y la Universidad Especializada de las Américas. Este software se desarrolló basado en el libro de Mabel Condemarín, Hurganito como método tradicional, donde su uso es exclusivamente en Tablet con conexión a internet y asistido por un especialista en dificultades en el aprendizaje [8]. Además, SEDI tiene una base psicopedagógica, producto de un análisis del proceso de reeducación de las dificultades en el aprendizaje que presentan los niños con dislexia que realizan los especialistas en dificultades en el aprendizaje (DIFA) del Centro de Atención e Investigación en Educación y Salud (CIAIES) de la Universidad Especializada de las Américas.

Motivados por el desarrollo de este sistema, surge la necesidad de realizar una investigación que conlleva la evaluación del impacto de su uso, seleccionando un Centro Educativo Primario en la provincia de Veraguas. El objetivo fundamental de esta investigación es evaluar el impacto del uso de una técnica reeducativa digital (Plataforma Virtual SEDI) en el proceso de reeducación de niños disléxicos en un centro educativo primario ubicado en la provincia de Veraguas.

Basados en este objetivo, se planteó que a través del uso de la Plataforma Virtual SEDI se obtendría un impacto positivo en el proceso de reeducación de niños disléxicos en un centro educativo primario.

II. Metodología

Este proyecto se enmarcó en 3 etapas, las cuales se realizaron en un tiempo estimado de 15 meses. En estas etapas se elaboraron los instrumentos de evaluación e intervención a estudiantes de un Centro Educativo Primario, ubicado en la provincia de Veraguas, área central de la República de Panamá. Posteriormente, se aplicaron y analizaron las pruebas psicopedagógicas; y se desarrollaron los planes de intervención psicopedagógico por estudiante con Necesidad Educativa Especial (NEE) detectado, se ejecutó la intervención a los estudiantes con NEE y por último se compararon los resultados de la intervención a través de los instrumentos de evaluación psicopedagógica.

A. Organización de los instrumentos de evaluación e intervención a estudiantes del Centro Educativo

Se definió el Test Exploratorio de Dislexia Específica (TEDE), ya que se buscó ubicar al sujeto disléxico y efectuar un diagnóstico analítico de la lectura y de los errores en el área del reconocimiento de la palabra. Este Test fue basado en los autores de Mabel Condemarín y Marlys Blomquist, la cual consta de 171 ítems. Está dividida en dos partes, Nivel Lector con 100 ítems y Errores Específicos con 71, tal como se presenta en la tabla I.

TABLA I. Distribución del Test Exploratorio de Dislexia Específica

Análisis Cuantitativo			
Nivel Lector (100)			**Errores Específicos (71)**
Primer nivel (30)	Segundo nivel (40)	Tercer nivel (30)	

En la primera parte se puede determinar el grado de dificultad que es capaz de resolver el niño, en lectura y en la segunda se puede detectar los errores que comete el niño. En la tabla II se presenta la estructura de la prueba en cuanto al nivel de lectura.

En este nivel de lectura se tomaron como base el círculo fonético, es decir, todas las formas posibles de combinación de letras que se dan en la lengua castellana. Estas combinaciones aparecen en forma separada y en complejidad creciente.

TABLA II. Estructura de la prueba – Nivel de Lectura

NIVEL DE LECTURA	
Primer Nivel de Lectura	Nombre de la letra Sonido de la Letra Sílaba directa con consonante de sonido simple
Segundo Nivel de Lectura	Sílaba directa con consonante de doble sonido Sílaba directa con consonante de doble grafía Sílaba directa con consonante seguida de u muda Sílaba indirecta de nivel simple Sílaba indirecta de nivel complejo Sílaba compleja Sílaba con diptongo de nivel simple
Tercer Nivel de Lectura	Sílaba con diptongo de nivel complejo Sílaba con grupo consonántico de nivel simple Sílaba con grupo consonántico de nivel complejo Sílaba con grupo consonántico y diptongo de nivel complejo Sílaba con grupo consonántico y diptongo de nivel complejo

Para el nivel de errores específicos, se seleccionaron las palabras que presentan las dificultades típicas que inducen a error al niño disléxico. La estructura de la prueba en cuanto a los errores específicos se presenta en la siguiente tabla.

TABLA III. Estructura de la prueba – Errores Específicos

ERRORES ESPECÍFICOS
Letras confundibles por sonidos al principio de palabra
Letras confundibles por grafía semejante
Inversiones de letras
Inversiones de palabras completas
Inversiones de letras de la palabra
Inversión del orden de la sílaba en la palabra

En relación a la edad esta prueba discrimina mejor entre niño de siete años y medio y diez años de edad. Antes de los

siete años y medio. Los signos disléxicos tales como inversiones o confusiones parecen más o menos típicos de los lectores inmaduros.

Después de los diez años, por los efectos de la madurez, el disléxico supera la mayor parte de los signos disléxicos en cuanto al reconocimiento de la palabra y comienza a presentar dificultades en los aspectos de comprensión y velocidad lectora, aspectos que esta prueba no mide directamente. Existen casos excepcionales de dislexia severa en los cuales, pese a la edad, se siguen manifestando los signos descritos [10].

La población estudiantil total de la escuela seleccionada fue de 50 alumnos distribuidos desde pre-kinder hasta sexto grado. Los mismos se dividían en 3 salones: Pre-Kinder y Kinder, Primero a Tercer grado y Cuarto a Sexto grado.

Debido a la edad de la población estudiantil, los grados que cursaban y el perfil para el cual está diseñado la Plataforma SEDI, se decidió tomar la muestra de la población que estuviera entre las edades de 7 a 10 años. Con el Test Exploratorio de Dislexia Específica (TEDE), se puedo ubicar al sujeto disléxico y efectuar un diagnóstico analítico de la lectura y de los errores en el área del reconocimiento de la palabra.

Cabe destacar que para realizar el "Test Exploratorio de Dislexia Específica", se requirió de una autorización del centro educativo y de los padres de familia. Con autorización previa, se procedió a aplicar el TEDE a 27 estudiantes seleccionados según los resultados de las entrevistas y perfil de los estudiantes según las necesidades del estudio.

Con la aplicación de test exploratorio, se identificó a 14 estudiantes con dificultades en el aprendizaje de la lectoescritura. Por ello, se procedió a determinar que la muestra total es de 14 estudiantes, en donde nuestro grupo experimental constó de 7 estudiantes al igual que el grupo control, los cuales están divididos por edad y nivel académico tal como lo presenta la tabla IV.

TABLA IV. DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA DEL ESTUDIO

Grupo	N.	Estudiantes	Edad	Grado
Grupo Experimental	1	EGE-1	7	II
	2	EGE-2	8	II
	3	EGE-3	8	III
	4	EGE-4	9	III
	5	EGE-5	9	III
	6	EGE-6	10	IV
	7	EGE-7	10	IV
Grupo Control	1	EGC-1	7	II
	2	EGC-2	7	II
	3	EGC-3	8	II
	4	EGC-4	9	III
	5	EGC-5	9	III
	6	EGC-6	10	IV
	7	EGC-7	10	IV

B. Aplicación de las pruebas psicopedagógicas y desarrollar los planes de intervención psicopedagógico por estudiante con Necesidades Educativas Especiales

Para este estudio se tuvo el apoyo de cuatro (4) especialistas en Dificultades en el Aprendizaje las cuales laboran en la Universidad Especializada de las Américas sede Veraguas, las cuales fueron las encargadas de realizar la atención de los niños que fueron parte del estudio.

Para los estudiantes de la muestra se desarrolló y se puso en marcha los planes reeducativos en donde, para el grupo experimental se tomaría en cuenta el uso de la plataforma virtual SEDI en conjunto con las técnicas reeducativas tradicionales y para el grupo control sólo las técnicas reeducativas tradicionales.

Los planes reeducativos presentan la planificación que debe llevar el especialista para atender las necesidades reeducativas del estudiante según las deficiencias encontradas. Por ello, cada especialista procedió a desarrollar los planes reeducativos de cada estudiante en base a las áreas deficientes encontradas en cada uno, por ello, estos son individualizados. Luego de ello, la ejecución de los planes reeducativos duro aproximadamente 6 meses.

En la aplicación de los instrumentos evaluativos, se hizo un Postest. Después del periodo de intervención o ejecución de los planes reeducativos, se procedió a aplicar nuevamente el TEDE como Postest. En la aplicación del TEDE como pretest y postest se obtuvieron diversos resultados.

III. RESULTADOS

Como resultado de este estudio, tenemos los datos recabados del Pretest y del Postest tanto del grupo experimental y del grupo control.

En la tabla de resultados del TEDE aplicado como PreTest, se puede apreciar los puntajes que obtuvieron los estudiantes en el grupo experimental y control.

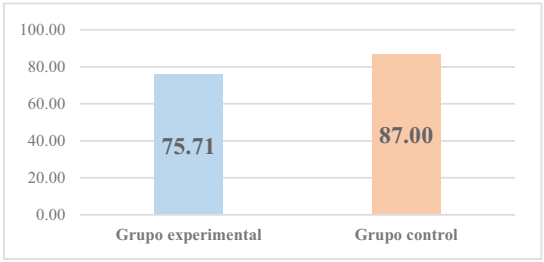
TABLA V. RESULTADOS DEL TEDE APLICADO COMO PRETEST

Grupos	N	Edad	Grado	Nivel Lector (100)				Errores Específicos (71)
				Primer Nivel (30) Acierto	Segundo Nivel (40) Acierto	Tercer Nivel (30) Acierto	Puntaje	Puntaje
Grupo Experimental	**1**	**7**	**II**	26	0	0	**26**	**0**
	2	**8**	**II**	29	36	29	**94**	**66**
	3	**8**	**III**	29	38	28	**95**	**61**
	4	**9**	**III**	18	29	20	**67**	**63**
	5	**9**	**III**	29	37	28	**94**	**66**
	6	**10**	**IV**	28	37	29	**94**	**66**
	7	**10**	**IV**	17	25	18	**60**	**55**
Grupo Control	**1**	**7**	**II**	29	33	23	**85**	**62**
	2	**7**	**II**	28	35	24	**87**	**67**
	3	**8**	**II**	28	30	23	**81**	**59**
	4	**9**	**III**	24	39	30	**93**	**66**
	5	**9**	**III**	30	35	21	**86**	**61**
	6	**10**	**IV**	25	38	27	**90**	**66**
	7	**10**	**IV**	29	33	25	**87**	**67**

En la siguiente figura se muestra una comparación de los resultados obtenidos en el área de "Nivel Lector" en el Pre-Test, que consta de 100 ítems. Para esto se obtuvo el promedio de los 7 estudiantes del grupo experimental y de los 7 estudiantes del grupo control.

Como se puede apreciar en la siguiente Fig. 1, hay una diferencia de 11.29 puntos, favorables para el grupo control.

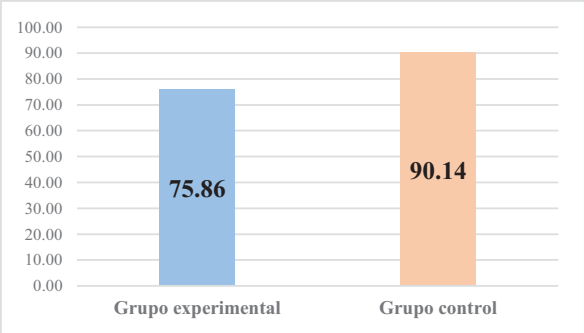
Fig. 1. Comparación de Nivel Lector en el PRE-TEST



En la Fig. 2 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en el área de "errores específicos" en el Pre-Test, que consta de 71 ítems. Para este caso se transformaron los puntajes obtenidos por cada estudiante, considerando 71 como el 100%.

Se obtuvo el promedio de los 7 estudiantes del grupo experimental y de los 7 estudiantes del grupo control, en donde tenemos una diferencia de 14%, favorables para el grupo control.

Fig. 2. Comparación de Errores Específicos en el PRE-TEST



Fue de suma importancia aplicar la prueba posterior al periodo de intervención o ejecución de los planes reeducativos. De esta manera se podría conocer el impacto en la utilización de la Plataforma SEDI.

En la siguiente tabla, podemos apreciar el puntaje obtenido por los estudiantes del grupo experimental y control.

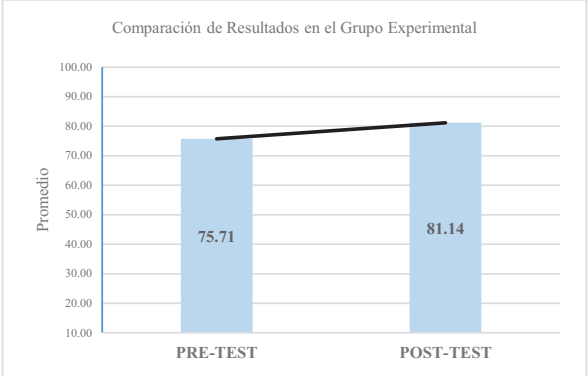
TABLA VI. RESULTADOS DEL TEDE APLICADO COMO POSTEST

Grupos	N	Edad	Grado	Nivel Lector (100)				Errores Específicos (71)
				Primer Nivel (30) Acierto	Segundo Nivel (40) Acierto	Tercer Nivel (30) Acierto	Puntaje	Puntaje
Grupo Experimental	1	7	II	27	2	3	**32**	**2**
	2	8	II	30	40	30	**100**	**69**
	3	8	III	30	40	30	**100**	**66**
	4	9	III	20	32	22	**74**	**65**
	5	9	III	30	39	29	**98**	**68**
	6	10	IV	30	40	30	**100**	**67**
	7	10	IV	19	25	20	**64**	**58**
Grupo Control	1	7	II	30	34	23	**87**	**63**
	2	7	II	29	37	25	**91**	**69**
	3	8	II	30	33	24	**87**	**61**
	4	9	III	25	40	30	**95**	**67**
	5	9	III	30	36	23	**89**	**62**
	6	10	IV	30	35	27	**92**	**68**
	7	10	IV	27	39	27	**93**	**66**

Con respecto a la comparación de los resultados del grupo experimental, se tomó los resultados del Pre-Test y Post-Test del área de "Nivel Lector" y se representaron en la Fig. 3.

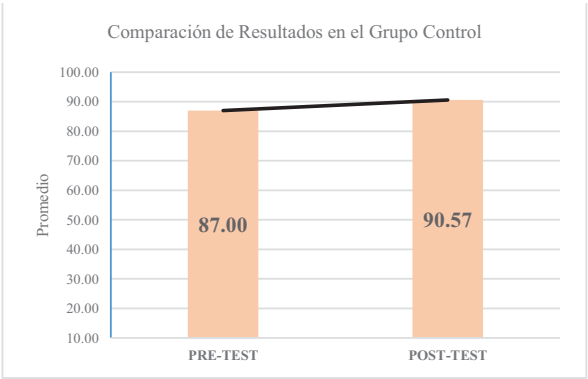
Se puede apreciar una mejora en la puntuación con una diferencia de 5.43 puntos.

Fig. 3. Comparación del Grupo Experimental en el Pre-Test y Post-Test en el área de Nivel de Lector



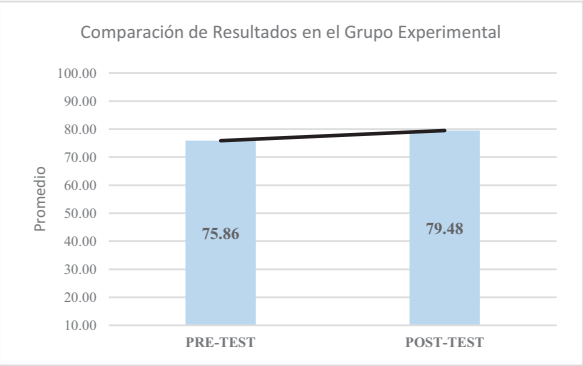
De la misma manera, se hizo la comparación de los resultados del grupo control, en donde se tomó los resultados del Pre-Test y Post-Test del área de "Nivel Lector" y se representaron en la Fig. 4. Se puede apreciar una diferencia en la puntuación de 3.57.

Fig. 4. Comparación del Grupo Control en el Pre-Test y Post-Test en el área de nivel de lector



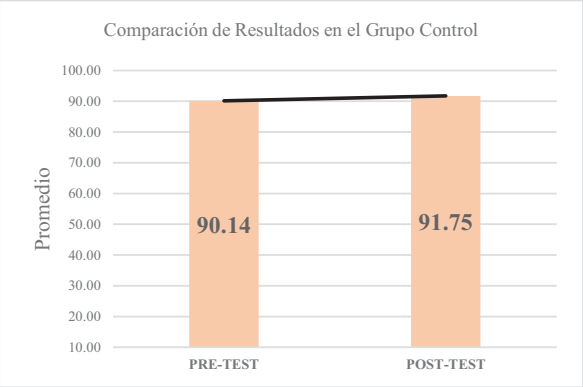
Con respecto a la comparación de los resultados del grupo experimental del área de "errores específicos", se tomó los resultados del Pre-Test y Post-Test y se representaron en la Fig. 5, en donde se puede apreciar un aumento en la puntuación, con una diferencia de 3.62 puntos.

Fig. 5. Comparación del grupo experimental en el Pre-Test y Post-Test en el área de errores específicos



De igual forma, se hizo la comparación de los resultados del grupo control, donde se tomó los resultados del Pre-Test y Post-Test del área de "errores específicos" y se representaron en la siguiente figura, en donde se puede apreciar una diferencia en la puntuación de 1.61.

Fig. 6. Comparación del grupo experimental en el Pre-Test y Post-Test en el área de errores específicos



IV. Conclusiones

Es importante recalcar que para ambos grupos se aplicó la misma prueba psicopedagógica para medir el nivel de lectura de los estudiantes. Luego de ello, se desarrollaron planes reeducativos con las técnicas tradicionales y con la misma estructura de atención, pero teniendo como variable entre los grupos, que en los planes reeducativos del grupo experimental se introdujo como técnica reeducativa digital el uso de la Plataforma Virtual SEDI y para el grupo control no.

Al finalizar el periodo reeducativo se volvió a aplicar la misma prueba psicopedagógica para obtener los datos que se analizaron en los resultados.

Como se puede apreciar en dichos resultados, podemos determinar que la implementación de una técnica digital, como lo es la Plataforma Virtual SEDI, en el planeamiento reeducativo representa un impacto positivo en el proceso de la reeducación niños disléxicos. Esto es debido a que en el grupo experimental se presentó un incremento mayor en cuanto a la mejora de la puntuación del Post-Test. Sin embargo, ambas técnicas mostraron un incremento significativo en la puntuación obtenida en el post-test.

Además de estos resultados cuantitativos que hemos analizado, la percepción de las especialistas es que implementar una herramienta reeducativa digital como esta en los planes reeducativos impacta positivamente en la motivación del niño frente al proceso reeducativo, expresando que los mismos llegan a las sesiones con más ánimo y disposición ante el aprendizaje.

Se debe tener claro que el proceso reeducativo con técnicas tradicionales es efectivo, y la implementación de la Plataforma Virtual SEDI viene siendo un apoyo para que los niños puedan desarrollar su aprendizaje a través del uso de herramientas tecnológicas.

Cabe destacar que el resultado de esta evaluación ayudó al mejoramiento de la plataforma para ofrecer una herramienta confiable a los especialistas en dificultades en el aprendizaje que la utilizan.

References

[1] S. C. Edo y C. A. Roqueta, «Un estudio sobre la mentalidad de crecimiento en niños con dislexia,» *Escritos de Psicología,* vol. 11, nº 1, pp. 25-33, 2018.

[2] CEDE, «DSM 5: Novedades y Criterios Diagnósticos,» 28 Febrero 2019. [En línea]. Available: http://www.codajic.org/sites/www.codajic.org/files/DSM%205%20%20Novedades%20y%20Criterios%20Diagn%C3%B3sticos.pdf.

[3] Madrid con la Dislexia, «Guía La Dislexia,» 8 Marzo 2019. [En línea]. Available: http://www.madridconladislexia.org/wp-content/uploads/2014/04/Gu%C3%ADa-Madrid-con-la-Dislexia-.pdf#page=3&zoom=auto,-158,307.

[4] D. Cubilla-Bonnetier, A. Solís-Rodríguez, F. Farnum y J. Caballero, «Dislexia, rendimiento lector y su relación con la inequidad y el desempeño escolar,» *Revista de Investigación y Pensamiento Crítico* , vol. 9, nº 2, pp. 4-15, 2021.

[5] K. Rodríguez-Martínez, M. d. J. Díaz-Quintero y Q.-F. Natividad , «Herramienta Tecnológica para el Tratamiento de las,» de *International Symposium on Innovation and Technology*, Lima, 2011.

[6] R. M. Hernandez, «Impacto de las TIC en la educación: Retos y Perspectivas,» *Propósitos y representaciones,* vol. 5, nº 1, pp. 325 - 347, 2017.

[7] É. Valencia Perdomo, «Universidad Luterana Salvadoreña, Centro Universitario Regional de Cabañas,» Creative Commons, 12 08 2019. [En línea]. Available: http://curc.uls.edu.sv/pagina.php?id=44#. [Último acceso: 04 09 2019].

[8] J. M. Ponce Rodas, «Sistema tutorial multimedia basado en tecnología B-Learning para mejorar el proceso de comunicación en niños con necesidades educativas especiales del Colegio de Educación Especial n°2 "Niño Jesús de Praga" -Pimentel,» 27 Abril 2012. [En línea]. Available: http://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/521. [Último acceso: 10 Enero 2019].

[9] M. Díaz-Quintero, K. Rodríguez y N. Quintero-Fuentes, «Guía de Estilo para el Diseño de Interfaces de Software Educativos para el Apoyo a la Reeducación de los Niños con Dislexia,» de *Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética – (CICIC)*, Orlando, 2014.

[10] . S. Tamayo Lorenzo, «La dislexia y las dificultades en la adquisición de la lectoescritura,» *Revista de Currículum y Formación de Profesorado,* vol. 21, nº 1, pp. 423-432, 2017.

Application of an Inquiry-Based Learning Space (ILS) GRAASP in the course of differential equations for engineering students within the framework of the project WP@ELAB

Aplicación de un espacio de aprendizaje basado en Indagación (ILS) GRAASP en el curso de ecuaciones diferenciales para estudiantes de ingeniería en el marco del proyecto WP@ELAB

Dayana Barrera-Buitrago[1], Nidia Lugo López[1], Freddy Torres-Payoma[1], Diana Carolina Herrera[1], Francesc Alpiste Penalba[2], Jordi Torner Ribé[2], Laura Daniela Neira-Quintero[1].
[1]Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologìa e Ingenierìa,
[2]Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech. Spain.

***Abstract*— With the evolution of Information and Communication Technologies (ICT) and the progressive growth of Virtual Learning Environments (VLE), new development needs arise in terms of teaching-learning methodologies in the classroom. On the other hand, the remote education for the COVID-19 health emergency worldwide had a positive impact in the virtual education, increasing the number of online courses through virtual platforms, in which researchers and teachers will be able to develop and implement classroom learning spaces, among which Massive Open Online Courses (MOOC's) and Inquiry-Based Learning Spaces (ILS) stand out. This paper presents the application process of an ILS of differential equations through the free resource GRAASP and published in the Golabz platform during Differential Equations of the Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Hake's gain is used for learning assessment, an average gain of 0.37 was found, which implies a medium learning gain.**

Keywords—Hake gain, ILS, GRAASP, Golabz, Virtual Learning Spaces, differential equations.

***Resumen* — Con la evolución de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) y el progresivo crecimiento de los Espacios Virtuales de Aprendizaje (EVA), se plantean nuevas necesidades de desarrollo en tanto a las metodologías de enseñanza-aprendizaje en el aula. Por otra parte, la educación remota durante la emergencia sanitaria del COVID-19 a nivel mundial tuvo un impacto positivo para la educación virtual, aumentando la cantidad de cursos online a través de plataformas virtuales, en el cual, los investigadores y docentes podrán desarrollar e implementar en el aula espacios de aprendizaje, entre los más relevantes los cursos online masivos y abiertos (MOOC) y los espacios de aprendizaje basados en Indagación (ILS). El presente trabajo presenta el proceso de aplicación de un ILS de ecuaciones diferenciales a través del recurso gratuito GRAASP y publicado en la plataforma Golabz en el curso de Ecuaciones Diferenciales de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Para la evaluación del aprendizaje se utiliza la ganancia de Hake; se encontró una ganancia promedio de 0,37 lo que implica una ganancia media del aprendizaje.**

Palabras claves — ganancia de Hake, ILS, GRAASP, Golabz, Espacios Virtuales de Aprendizaje, ecuaciones diferenciales.

I. INTRODUCCIÓN

La Alianza Mundial de Péndulos (World Pendulum Alliance WPA@ELAB) es un proyecto global que ha distribuido una red de péndulos remotos en diferentes latitudes del planeta que permiten la determinación experimental de la gravedad con alta precisión y la elaboración de un mapa gravitacional desde varios puntos de la superficie terrestre [1]. Además de la instalación de la red pendular y su uso, el proyecto busca mejorar la calidad y cobertura de la educación superior a través de crear capacidades y conocimiento en la instalación y funcionamiento de laboratorios remotos en los países participantes, así como la creación de contenido educativo en el área de ciencias naturales y matemáticas.

El uso de los laboratorios remotos se ha introducido en la enseñanza universitaria desde los años 2003 [2] y ha aumentado su implementación desde la pandemia del COVID-19 y se ha ido incorporando en las etapas educativas como recurso didáctico junto a los laboratorios virtuales. Los laboratorios remotos consisten en un montaje experimental real en un espacio físico definido que utiliza un sistema de software y hardware cercano o local para la toma de datos y vídeo, envía la información a un equipo que actúa como servidor y al cual se conectan los estudiantes o usuarios. Los laboratorios remotos y virtuales están integrados en Inquiry Learning Spaces (ILS). De Jong, et al. resumieron las tecnologías para el aprendizaje por indagación, como

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00059

simulaciones y laboratorios en línea, gamificación y entornos de modelado [3]. Go-Lab integra laboratorios en línea junto con ILS y otros recursos de aprendizaje como herramientas de andamiaje interactivo donde el sistema de creación permite a los profesores desarrollar entornos de aprendizaje. El ecosistema Go-Lab está patrocinado por la Unión Europea UE (FP7: Go-Lab, H2020 Next-Lab y GO-GA) [3]. Su desarrollo comenzó en 2013.

El ecosistema Go-Lab consta de dos entornos en línea. El primero es el sistema de soporte y compartición (Golabz) que incluye recursos digitales y el segundo es un sistema de autor (Graasp) que permite la creación y publicación colectiva de ILS. Graasp es una plataforma de aprendizaje social, un sistema de autoría (www.graasp.eu) que admite: aprendizaje por indagación, uso de laboratorios en línea y creación de espacios personalizados [4]. Por otra parte, Golabz permite el uso de recursos interactivos disponibles públicamente que apoyan la educación STEM, pero también permite su creación e implementación con la participación de colegas y estudiantes y, finalmente, su publicación a través de Creative Commons, cuyo énfasis es proporcionar acceso a laboratorios en línea para enriquecer la experiencia formativa [5].

En este trabajo se presenta el contenido educativo desarrollo en Graasp como apoyo en la enseñanza del curso de Ecuaciones Diferenciales de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. El curso está orientado para los programas de ingenierías: industrial, sistemas, telecomunicaciones, electrónica, alimentos, ambiental y agroforestal, siendo un curso transversal a estos programas.

Para tener más rigor en el análisis del aprendizaje obtenido por los estudiantes, se mide la ganancia del factor de Hake para cada pregunta y todo el cuestionario, que corresponde a la fórmula [6]:

$$g = \frac{POS - PRE}{100 - PRE} \quad (1)$$

POS es el cuestionario final (Postest) y PRE el cuestionario inicial (Pretest). Esta ganancia se establece, según los siguientes intervalos:

- Si la ganancia $g \leq 0{,}3$ del aprendizaje es baja.
- Si la ganancia $0{,}3 < g \leq 0{,}7$ del aprendizaje es media.
- Si la ganancia $g > 0{,}7$ del aprendizaje es alta.

La metodología del curso ecuaciones diferenciales cuenta con tres unidades: ecuaciones diferenciales de primer orden, de orden superior y transformada de Laplace. La actividad del aprendizaje se desarrolló haciendo uso de la herramienta desarrollada en Graasp estuvo en la unidad 2, específicamente en el tema de las aplicaciones de las ecuaciones diferenciales de orden superior. El resultado del aprendizaje del curso que corresponde a esta actividad específicamente es: solucionar con diferentes métodos matemáticos situaciones problema que involucran las ecuaciones diferenciales de orden superior. Con el fin de dar solución a problemas relacionados con la ciencia e ingeniería, lo que explica que el Graasp sea de las aplicaciones de las ecuaciones diferenciales de segundo orden homogéneas. Debe ser al modelo físico del péndulo simple.

El espacio de aprendizaje por indagación (ILS) desarrollado Graasp Ecuaciones Diferenciales, disponible en [7], cuenta con seis (6) escenarios de aprendizaje y dos (2) de control de acceso a las métricas y datos para estudiantes y docentes. En la Tabla 1, se describe el flujo de trabajo que desarrollará el docente y el estudiante.

TABLE I. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS GRAASP-ED

Escenario	**Descripción**
Introducción	En este espacio, se registran los contenidos y objetivos previos del GRAASP.
Evaluación Inicial	Presenta un formulario que evalúa los conocimientos previos. En este lugar se encuentra el cuestionario inicial PRE.
Contenido	Muestra un acopio de conceptos necesarios para la interpretación de la ecuación diferencial del péndulo simple.
Actividad de aprendizaje	El contenido es representado a través de un cuestionario de cinco (5) preguntas abiertas a los estudiantes sobre los ejes temáticos contemplados en el contenido.
Evaluación Final	Presenta un formulario que valúa los conocimientos después de la implementación del espacio. En este lugar se encuentra el cuestionario final POS.
Conclusiones	Se proponen las conclusiones del GRAASP.
Student Dashboard	Escenario donde el estudiante podrá acceder a su progreso.
Teacher Dashboard	Escenario donde el profesor podrá hacer seguimiento de las actividades de sus estudiantes.

La construcción del espacio del ILS está basado en Indagación Guiada, pues el tutor tendrá la función de orientar al estudiante mediante encuentros sincrónicos la ruta de aprendizaje que deberá efectuar para cumplir con los objetivos de aprendizaje [8] y [9]. Por otra parte, la metodología de los cuestionarios PRE y POS son tipo Prueba Objetiva Cerrada (POC).

A continuación, se describe la metodología, los resultados y las conclusiones de la implementación del GRAASP en el curso de ecuaciones diferenciales en estudiantes de ingeniería de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en el marco del proyecto World Pendulum Alliance (WP@ELAB).

II. METODOLOGÍA

A. Instrumento

Teniendo en cuenta las características en torno a la metodología a emplear, la metodología cuantitativa se establece bajo una aproximación cuasiexperimental con las pruebas PRE y POS, la técnica utilizada para la recopilación de la información fue la encuesta, tomando como instrumento un cuestionario compuesto por siete (7) preguntas de opción múltiple con única respuesta distribuido como se describe en la Tabla II, en la columna uno se indica la pregunta y en la columna dos que se quería indagar con ella.

TABLE II. TRABAJO DE CAMPO

Pregunta	Propósito de la pregunta
1	Determinar si los estudiantes identifican la ecuación diferencial que modela el péndulo simple.
2	Observar si el estudiante es capaz de solucionar la ecuación diferencial implícita en el modelo físico del péndulo simple.
3	Reconocer si los participantes distinguen la ecuación del movimiento armónico simple como la solución de la ecuación diferencial.
4	Indagar en los estudiantes si dentro de un problema de aplicación (en este caso el péndulo), es capaz de resolver una solución particular de la ecuación diferencial.
5	Investigar si el estudiante soluciona el problema de valor inicial implícito en una situación física del péndulo simple.
6	Explorar la idea conceptual del péndulo en situaciones reales.
7	Indagar si el estudiante conoce el concepto de periodo.

B. Trabajo de campo

El desarrollo de la actividad se hizo en tres etapas pretest-aplicación de la estrategia -postest. Los estudiantes tuvieron en promedio 37 minutos para responder el pretest y el postest.

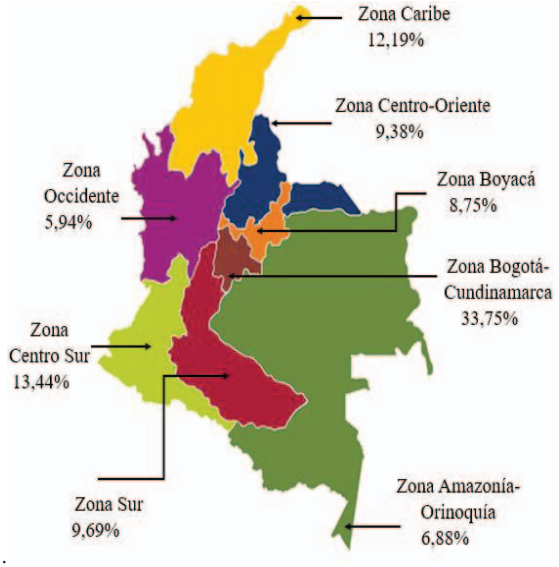


Fig. 1. Distribución de la muestra de estudiantes del curso Ecuaciones Diferenciales a lo largo del país.

Primero se realizó la prueba diagnóstica PRE cuyo objetivo es indagar sobre los conocimientos previos que los estudiantes tienen sobre ecuaciones diferenciales homogéneas de segundo orden. Paso seguido se implementó el módulo o GRAASP, usando estrategias sincrónicas y asincrónicas de acompañamientos (foros, redes sociales, conferencias, entre otras). La última fase concluye en la prueba POS la cual da muestra de los conocimientos adquiridos por los estudiantes en el transcurso del desarrollo del módulo. El lector puede encontrar el recurso pedagógico utilizado en [10].

A. Población y muestra

La aplicación del ILS se realizó con estudiantes de la Universidad Nacional Abierta y/a Distancia - UNAD. Los participantes de la investigación son alumnos de los programas de ingeniería de alimentos, sistemas, telecomunicaciones, electrónica e industrial que se matricularon al curso de ecuaciones diferenciales para el primer semestre de 2022.

La muestra objetivo fue de 320 estudiantes, a los que se les pidió participar de manera voluntaria en la actividad lo que llevo a que algunos no completaran el recurso. La muestra final contó con 67 estudiantes.

B. Ubicación de estudiantes

La universidad por su naturaleza virtual, tienen ofertas a nivel nacional, por ende, los estudiantes que realizaron la actividad pertenecen a diferentes zonas de Colombia. En el mapa se muestran la localización de las zonas del país donde la UNAD tiene estudiantes y sedes.

TABLE III. DISTRIBUCIÓN DE ESTUDIANTES POR ZONAS EN EL PÁÍS

Zona	Abreviatura	%
Amazonia Orinoquia	ZAO	6,88%
Bogotá- Cundinamarca	ZCBC	33,75%
Boyacá	ZBOY	8,75%
Caribe	ZCAR	12,19%
Centro Sur	ZCSUR	13,44%
Centro Oriente	ZCORI	9,38%
Occidente	ZOCC	5,94%
Sur	ZSUR	9,69%

En la Tabla III, se caracteriza la muestra de estudiantes de la UNAD por zonas y su nomenclatura. observa que la tercera parte de los estudiantes pertenece a la ZCBC (33.75%), esto es debido al número de matrículas que tienen las sedes de la universidad, en especial, la sede José Acevedo y Gómez ubicada en la capital Bogotá DC. Entre tanto, las de menor porcentaje (ZAO con 6,88% y ZOCC) (Fig. 2) son las zonas en el país que tienen dificultades en cuanto a cobertura de redes de telecomunicaciones y energía eléctrica en el país [11].

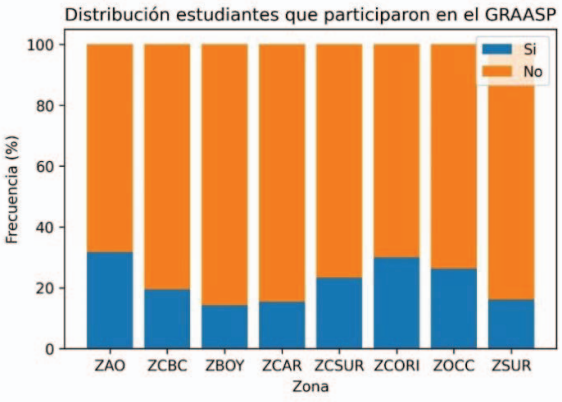


Fig. 2. Distribución de la muestra de estudiantes del curso Ecuaciones Diferenciales a lo largo del país.

Los resultados de la Tabla IV resalta que un 79.06% de estudiantes NO completaron todo el desarrollo del GRAASP y tan solo el 20.94% desarrollaron a cabalidad el espacio, lo que se puede explicar porque algunos estudiantes pertenecen a zonas con difícil acceso para conectividad, la zona Caribe,

Centro Sur, Sur, Amazonia Orinoquia u Occidente, de estos aproximadamente el 48,75% del total del curso, además de que la aprobación del curso estuvo en el 64%, obteniendo una perdida del 36%, que estuvo muy relacionada con la falta de compromiso en la entrega oportunidad de las actividades propuestas.

TABLE IV. DISTRIBUCIÓN DE ESTUDIANTES SEGÚN PRESENTACIÓN.

ZONA	NO	SI
Amazonia Orinoquia	68,18%	31,82%
Bogotá- Cundinamarca	80,56%	19,44%
Boyacá	85,71%	14,29%
Caribe	84,62%	15,38%
Centro Sur	76,74%	23,26%
Centro Oriente	70,00%	30,00%
Occidente	73,68%	26,32%
Sur	83,87%	16,13%
Total	79,06%	20,94%

Se resalta, de la interacción con algunos estudiantes de las zonas con mayores problemas de conectividad, problemas con el cargue de la página o de la plataforma.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las respuestas de los estudiantes se recopilaron mediante los dos formularios de PRE y POS. Luego se asignó a cada estudiante en cada pregunta un puntaje p_i que es igual a 1 si la respuesta es correcta y es igual a 0 si la respuesta no es correcta, de tal forma que la métrica es la razón entre el número total de aciertos y el total de los $N = 67$ estudiantes, este resultado al final se multiplica por el 100, para colocar los puntajes en una escala de 0 a 100, como lo explica en las siguientes fórmulas:

$$PRE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_{i(pre)}\right) \cdot 100$$

$$POS = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_{i(pos)}\right) \cdot 100$$

Las métricas anteriores se calculan para cada una de las siete preguntas en el PRE y POS, teniendo los resultados registrados en la Tabla V.

En la Fig. 3, se evidencia que para cinco de las siete preguntas se obtiene una ganancia del aprendizaje, debido a que la línea azul que corresponde a las preguntas del POS está por encima del PRE. Para tener un análisis más detallado de cada pregunta en la Tabla V se encuentran los resultados del PRE y POS, donde también se muestra la ganancia y el nivel correspondiente de ganancia del aprendizaje.

Se resalta una ganancia en el aprendizaje significativa en las preguntas 1 y 4, ganancia alta y media respectivamente, según la Tabla V. Esta preguntas corresponden a los siguientes resultados de aprendizaje:

i. El estudiante identifica la ecuación diferencial que modela el péndulo simple.

ii. El estudiante dentro de un problema de aplicación es capaz de resolver la solución de la ecuación diferencial.

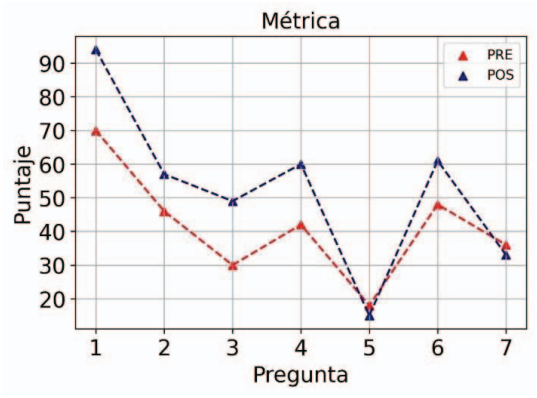


Fig. 3. Puntaje Pretest (PRE) y Postest (POS).

Resultados del Puntajes del pretest y postest

N	*PRE*	*POS*	Ganancia	Nivel de Ganancia del Aprendizaje
1	70	94	0,80	Alta
2	46	57	0,19	Baja
3	30	49	0,28	Baja
4	42	60	0,31	Media
5	18	15	0	Nula
6	48	61	0,26	Baja
7	36	33	0	Nula

Es importante mencionar que el instrumento empleado se validó a través del juicio de expertos y su confiabilidad se estudió por medio del Alfa de Cronbach con una prueba piloto. Como resultado de la primera parte se realizaron cambios en las preguntas, especialmente en redacción y opciones de respuesta, algunas se encontraban repetidas. Posteriormente la versión final se sometió a la prueba piloto, en esta se encontró que era necesario eliminar las preguntas 5 y 7, para que el valor de alfa fuera de 0,612, esto es un rango alto [12], una descripción más detallada del proceso de validación se puede leer en [13]. Por tal razón, las preguntas 5 y 7 son eliminadas del instrumento y no se tienen en cuenta para calcular el promedio de la ganancia del aprendizaje mediante el factor de Hake de todo el cuestionario, obteniendo como resultado 0,37, que se considera ganancia del aprendizaje media.

Por otra parte, dentro del POS se les preguntó a los estudiantes sobre la percepción que tuvieron con la realización de esta estrategia, obteniendo los resultados reflejados en la figura 3.

Fig. 3. Percepción de los estudiantes de la estrategia del aprendizaje del Graasp de Ecuaciones Diferenciales

Se observa que el 76,98% le gustó la actividad, el 14,31% le es indiferente y el 8,71% no le gustó. Los resultados permiten inferir que la mayoría de los estudiantes que hicieron uso de la herramienta les agradó y les permitió mejorar su aprendizaje en ecuaciones diferenciales siendo aplicadas en la solución de problemas simples de la física. El porcentaje significativo de los estudiantes que les es indiferente y no les gustó la herramienta (23,02%) debe conducir a una mejora en el diseño de la herramienta para próximas ediciones en donde se cumpla con que las ecuaciones diferenciales sean vistas como la solución de problemas simples de la física e influye en perfeccionar sus conocimientos en el curso.

El espacio del Graasp de Ecuaciones diferenciales se encuentra en el enlace https://www.golabz.eu/ils/graasp-ecuaciones-diferenciales [14].

AGRADECIMIENTOS

A los socios del Proyecto World Pendulum Alliance, a la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y al apoyo de los investigadores de la Universidad de Catalunya por su asesoría y apoyo. El proyecto WORLD PENDULUM ALLIANCE es cofinanciado por el programa Erasmus+ de la Unión Europea mediante el convenio de subvención 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

REFERENCIAS

[1] M. Escobar, H. Fernandes, O. Allard y Y. & Erazo, «Pendulum as an educational remote experiment.,» IEEE: 5th Experiment International Conference (exp. at'19), pp. 388-393, 2019.

[2] M. J. y J. Nickerson, «Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review,» ACM Computing Surveys, vol. 38, nº 3, p. 7, 2006.

[3] T. d. Jong, A. Lazonder, M. Pedaste y Z. Zacharia, «Simulations, games, and modeling tools for learning.,» de International Handbook of the Learning Sciences, Routledge, Taylor and Francis, 2018, pp. 256-266.

[4] T. d. Jong, D. Gillet, M. J. Rodríguez-Triana, T. Hovardas, D. Dikke, R. Doran, O. Dziabenko, J. Koslowsky, M. Korventausta, E. Law, M. Pedaste, E. Tasiopoulou, G. Vidal y Z. C. Zacharia, «Understanding teacher design practices for digital inquiry–based science learning: the case of Go-Lab,» Educational Technology Research and Development volume, vol. 69, pp. 417-444, 2021.

[5] D. Gillet, A. Vozniuk, M. J. Rodríguez-Triana y A. Holzer, «Agile, Versatile, and Comprehensive Social Media Platform for Creating, Sharing, Exploiting, and Archiving Personal Learning Spaces, Artifacts, and Traces,» de The World Engineering Education Forum, Seoul, Korea, 2016.

[6] R. Palau, J. Mogas-Recalde y S. Domínguez-García, «El proyecto go-lab como entorno virtual de aprendizaje: análisis y futuro,» Educar, vol. 56, nº 2, pp. 407-421, 2020.

[7] Y. Benitez & C. Mora, «Enseñanza tradicional vs aprendizaje activo para alumnos de ingeniería,» Rev. Cub. Fís, vol. 27, nº 2A, pp. 175-179, 2010.

[8] Liang, L., Deng, X., & Liu, Q, «Task-driven and objective-oriented hierarchical education method: A case study in linux curriculum,» IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education, pp. 316-318, 2008.

[9] N. Sbarbati, «Inquiry-based science education,» Revista CTS, vol. 10, nº 28, pp. 11-22, 2015.

[10] F. Torres-Payoma,, D. Herrera, K. Triana, L. Neira, & J. Castaño, «Computing the gravitational acceleration within the World Pendulum Alliance: an application of,» 2022.

[11] Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Región Central RAP-E, «Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central,» 2020. [En línea]. Available: https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf. [Último acceso: 2022].

[12] G. Díaz-Muñoz, «Metodología del estudio piloto,» *Revista chilena de radiología,* vol. 26, nº 3, pp. 100-104, 2020.

[13] D. Barrera-Buitrago, N. Lugo, F. Payoma, D. Herrera & L. Neira «Aprendizaje de las ecuaciones diferenciales de orden superior con fenómenos simples de la física en el marco de la alianza Internacional World Pendulum Alliance.,» *En proceso de construcción,* 2022.

[14] F. Torres-Payoma, D. Barrera y L. Neira, «Graasp Ecuaciones Diferenciales,» GO-LAB, 01 07 2022. [En línea]. Available: https://www.golabz.eu/ils/graasp-ecuaciones-diferenciales.

Construction and implementation of a Go-Lab inquiry learning space for teaching Energy Conservation in engineering and technology programs in General Physics Course

Construcción e implementación de un espacio de aprendizaje por indagación Go-Lab para la enseñanza de la Conservación de la Energía en programas de ingeniería y tecnologias en el curso de Física General

Freddy Torres-Payoma[1], Diana Carolina Herrera[1], Diana Lorena Tique[1], Dayana Barrera[1], Francesc Alpiste Penalba[2].
[1]Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) - Escuela de Ciencias Bàsicas, Tecnologia e Ingenieria,
[2]Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech. Spain.

Abstract— **The teaching of physics in virtual and distance higher education has always presented challenges due to the high rate of non-approval (>30%) and dropout rates (>10%). Information and communication technologies have allowed the development and creation of digital resources that allow students to be given other types of tools that improve the teaching-learning process. As a consequence, remote and virtual laboratories have gained importance as a complement in the teaching of concepts and skills in experimentation. In the same way, the digital spaces created based on Inquiry Learning have led students to have a greater understanding of concepts. This paper presents the result of the pedagogical implementation and creation path of an inquiry-based learning space (ILS) in Go-Lab. The educational tool was applied in the General Physics course offered to distance in engineering students of the Universidad Nacional Abierta y a Distancia within the framework of the World Pendulum Alliance (WP@ELAB) project. The results show that of the 345 students who made use of the resource, 234 approved the activity, which implies 68% of the sample. In addition, the qualitative analyzes of the students' appreciation of the use of technology in science still show gaps in terms of lack of knowledge in technology and internet coverage.**

Keywords— ILS, Go-Lab, virtual learning spaces, Physics, Remote labs, Virtual labs, Energy conservation.

Resumen — **La enseñanza de la física en la educación superior virtual y a distancia ha presentado siempre desafios debido a la alta tasa de no aprobación (>30%) y deserción (>10%). Las tecnologías de la información y la comunicación han permitido el desarrollo y creación de recursos digitales que permiten dar a los estudiantes otro tipo de herramientas que permiten mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje. Así los laboratorios remotos y virtuales han ganado importancia como complemento en la enseñanza de conceptos y de competencias en experimentación. De igual forma los espacios digitales creados basados en el aprendizaje por indagacion (Inquiry Learning Spaces "ILS") han conducido a que los estudiantes tengan una mayor comprensión de los conceptos. El presente trabajo presenta el resultado de la implementación pedagógica y ruta de creación de un espacio de aprendizaje basado en indagación (ILS) en Go-Lab. La herramienta educativa fue aplicada en el curso de Física general ofertado para estudiantes de ingenierías y tecnologías a distancia de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia en el marco del proyecto World Pendulum Alliance (WP@ELAB). Los resultados muestran que de los 345 estudiantes que hicieron uso del recurso, 234 aprobaron la actividad lo que implica un 68% de la muestra. Además, los análisis cualitativos a las apreciaciones de los estudiantes hacia el uso de la tecnología en ciencias muestran aún brechas en cuanto a falta de formación en tecnología y cobertura de internet.**

Palabras claves — Inquiry Learning Spaces, Go-Lab, espacios de aprendizaje virtuales, Física, Laboratorios Remotos, Laboratorios Virtuales, Conservación de la energia.

I. INTRODUCCIÓN

La evolución de las tecnologías de la información y de la comunicación han generado un impacto en los métodos de enseñanza-aprendizaje en la educación superior. Principalmente, la incorporación de la Educación Virtual y a Distancia ha permitido que cada día más personas tengan acceso a la Educación Superior, principalmente personas que por diversos factores sociales, económicos y humanos no tenían la posibilidad de asistir presencialmente a las aulas [1]. En Colombia, la Universidad Nacional abierta y a Distancia (UNAD), es la institución de educación superior que brinda educación abierta y a distancia, basado en el modelo de e-

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00060

Learning. Los Ambientes Virtuales de Aprendizaje (AVA) en la institución están incluidos en la plataforma de acceso a Campus Virtual (CV), al igual Objetos Virtuales de Aprendizaje (OVA) y otras herramientas tecnológicas que facilitan la interacción académica en la universidad [2]. El modelo de educación a abierta y a distancia pretende superar los límites socioeconómicos que refieren al acceso a la educación por cobertura en áreas de difícil acceso a la educación presencial. Esto permite que los estudiantes de cualquier región geográfica del país puedan participar en la educación superior promoviendo el desarrollo económico, social y humano sostenible en todo el territorio nacional [3,4].

Uno de los desafíos en la educación virtual y a distancia es la formación en el campo de la física, debido al bajo interés de los estudiantes en las temáticas y poca motivación en seguir el proceso formativo, lo que conduce a las altas tasas de no aprobación (>30%) y abandono (>10%), indicadores obtenidos en el curso de física general. Adicionalmente, la formación en experimentación en física, presenta desafíos adicionales, porque se siguen requiriendo espacios físicos con costosa infraestructura para el desarrollo de las experiencias lo que implica el desplazamiento de los estudiantes. Por esta razón, se han explorado diversas herramientas tecnológicas para la enseñanza de la física y la experimentación. Dos nuevos tipos de enseñanza denominados usualmente como laboratorios virtuales o laboratorios remotos se han introducido [3]. Los laboratorios remotos, consisten en un montaje experimental real en un espacio físico definido que utiliza un sistema de software y hardware cercano o local para la toma de datos y vídeo y que usualmente envía la información a un equipo que actúa como servidor y al cual se conectan los estudiantes o usuarios. La principal ventaja de los laboratorios remotos consiste en que el estudiante puede acceder desde cualquier punto geográfico con acceso a internet, y obtener datos reales. Por otra parte, los laboratorios virtuales consisten en la simulación de un laboratorio real a través de programación. Este tipo de laboratorios se desarrollan en plataformas de programación basadas en la mayoría de los casos en clases y objetos. La estructura general de un laboratorio virtual se basa en un servidor donde se encuentran el software desarrollado y en un cliente que accede a través de internet.

La UNAD como MEGAUNIVERSIDAD con más de 165 mil estudiantes en la actualidad, es la universidad más grande de Colombia [4]. En los últimos años ha realizado esfuerzos para incorporar los laboratorios remotos y virtuales en las diferentes áreas de enseñanza. Como parte de esto en el año 2020 se unió a la World Pendulum Alliance *(WP@ELAB)* [5], financiado por el programa de Erasmus+ de la Unión Europea (UE). El proyecto tiene como objetivo la instalación de una red de péndulos en diferentes partes geográficas para medir la aceleración de la gravedad con alta precisión; y la creación de contenido educativo para mejorar la enseñanza de la educación superior en las áreas de las ciencias naturales y las matemáticas.

En el marco del proyecto (WP@ELAB), la UNAD en el año 2022 producto de la investigación en pedagogía entre socios del proyecto: la Universidad de Catalunya, la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), logran construir un espacio virtual de aprendizaje por indagación (ILS de sus siglas en inglés *Inquiry Learning Space*) que hace uso de la red péndulos, para la enseñanza del Teorema de Conservación de la Energía en el curso de física general en estudiantes de ingeniería de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

El espacio fue creado en el ecosistema Go-Lab, un proyecto europeo que consta de dos entornos en línea. El primero, Golabz en entorno de soporte y compartición de contenido de recursos digitales. El segundo Graasp, es un sistema de autor que permite la creación y publicación colectiva de ILS como recursos educativos abiertos para apoyar el Aprendizaje Basado en Indagación (ABI) [6], uso de laboratorios en línea y creación de espacios virtuales personalizados [3]. El aprendizaje basado en la indagación (ABI) es una metodología de enseñanza-aprendizaje que utiliza técnicas dispuestas desde la pedagogía centrada en el uso del método y diseño de estudios científicos [7]. La estructura de la metodología se diseña a través de un modelo de cinco fases:

- *Orientación:* Permite crear un espacio dentro de otro espacio o ILS. Se centra al estudiante sobre el tema a investigar, el fenómeno a estudiar y la experiencia involucrada.
- *Conceptualización:* se define la ruta pedagógica sobre los contenidos teóricos y prácticos del tema a investigar, se plantea la hipótesis o planteamiento del problema.
- *Conclusión:* interacción entre las actividades realizadas en las fases de conceptualización e investigación proponen conclusiones respecto a los resultados obtenidos en la indagación de los fenómenos estudiados
- *Discusión:* se habilita un espacio de divulgación social del conocimiento adquirido bajo la estrategia ABI implementada en las fases anteriores [8].

A través de la página de Graasp, el profesor puede crear escenarios de aprendizaje de manera libre y publicar su espacio finalizado en la plataforma de Go-Lab. Un dato interesante es que, todo el material creado del proyecto quedará en proceso de evaluación para ser publicado de manera gratuita [9]. Por otra parte, se pueden incluir herramientas de uso libre externas al espacio, incluyendo laboratorios virtuales y remotos de terceros, así como incrustar página web y contenido audiovisual que se encuentren habilitada en la red [10].

El recurso digital se creó para el curso de Física General que hace parte del campo de formación interdisciplinar básico común, y está dirigido a los estudiantes que cursan los programas de Ingenierías y Tecnologías de Ingeniería (ECBTI). El curso permite que el estudiante se introduzca en el estudio de la mecánica clásica. De igual forma, el estudiante reconoce la importancia de la experimentación para comprobar hipótesis, así como desarrollar competencias de observación, análisis y argumentación; formando un pensamiento científico que le permite el análisis y solución de problemas reales [11].

El horizonte de la implementación del ILS dentro del currículo del curso como estrategia de enseñanza-aprendizaje de la conservación de la energía se compone desde el modelo educativo orientado en la UNAD (educación virtual y a distancia), para ello, las asignaturas de ciencias básicas disponen de un componente teórico construido por

TABLA I: ESTRUCTURA ABT DE LAS ACTIVIDAD DEL CURSO FÍSICA GENERAL

Momento	Actividad	Contenido	Puntos
Inicial	Prueba Objetiva Cerrada (POC)	Conceptos de álgebra, vectores, conversión de unidades, sistema internacional de medidas.	25
Intermedio	Tarea 1	Cinemática	75
	Tarea 2	Dinámica y Energía	75
	Tarea 3	Teoremas de conservación	75
	Tarea 4	Componente practico	125
Final	Prueba Objetiva Cerrada (POC)	Cinemática, Dinámica y Energía, Teoremas de conservación, Componente practico	125
		Total	500

Para cumplir con el propósito de formación del curso de Física General se usa una metodología de enseñanza denominada Aprendizaje Basada en Tareas (ABT) explicada en el Cap. 8 del libro Ref. [12]. La estructura del curso se divide en tres momentos (inicial, intermedio y final), dos Pruebas Objetivas Cerradas (POC) y cuatro (4) tareas. En la Tabla I se representa la organización del curso por momento, actividad, contenido y puntaje.

En el Campus Virtual (CV) del curso, brinda espacios de discusión entre estudiantes y docentes (foros) que fortalecen los procesos educativos entre los tutores y los estudiantes [14], así como los elementos OVA referidos a los contenidos del curso, mensajería interna y web conferencias sobre los contenidos teóricos, en la Fig. 1 se esquematiza cada escenario de acompañamiento según su modalidad.

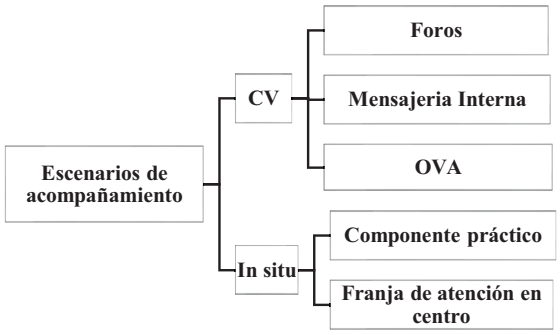


Fig. 1. Escenarios de acompañamiento tutor-estudiante mediante el modelo e-Learning.

La UNAD en su modalidad abierta ofrece en cada sede de la institución, a lo largo del país, escenarios de acompañamiento presenciales de atención a estudiantes por parte del cuerpo administrativo y docente, así como también, en las sedes se encuentran los equipos de laboratorio presenciales.

II. METODOLOGÍA

En este trabajo se presenta el proceso llevado a cabo para el diseño del recurso educativo en Go-Lab, en el curso de Física General, para la evaluación del momento intermedio, específicamente para la temática de conservación de la energía de la Tarea 3: Teoremas de Conservación. En la siguiente sección se presenta primero una descripción general del proceso de creación de un ILS en el ecosistema Go-Lab, continuando con el proceso llevado a cabo para el curso de Física General. Finalmente, se presentan los resultados y discusión.

A. Creación de un ambiente ILS en Go-Lab

Para la creación del espacio, se ingresó a la página oficial y registro en la plataforma y se inició con la personalización del espacio organizando las actividades y agregando el contenido creado. De esta forma, al ser publicado cada estudiante puede iniciar sesión y realizar una experimentación personalizada. Al iniciar la creación del espacio Graasp, se encuentra una lista desplegable de tres (3) opciones de inicio: *crear espacio, crear actividad y crear ILS.* La opción *crear espacio* habilita un escenario de aprendizaje donde se irán incluyendo los elementos, herramientas y recursos didácticos. Entre tanto, *crear actividad* presenta las diferentes actividades que puede empezar a incluir a su espacio, desde una plantilla en blanco, un seminario, un programa, la estructura de un Curso Online Abierto Masivo (MOOC de sus siglas en inglés Massive On-line Open Course), e-Libros e incluso, una consola de programación y un Inquiry Learning ILS. Finalmente, La opción *crear ILS* construye una sección con los bloques de programación, en este lugar, el creador podrá elegir entre diferentes tipos de estructuras ILS, entre algunos ejemplos, *Basic, Jigsaw, 5Es, Find the mistake,* entre otros escenarios.

Es la última etapa formal para crear un ambiente ILS adecuado para los estudiantes, el profesor tendrá que ingresar en cada subescenario y elegir las características que seguirá las fases del ABI. El menú desplegable del subescenario, el usuario encontrará seis (6) opciones diferentes para elegir contenido:

- *Crear espacio:* Permite crear un espacio dentro de otro espacio o ILS.
- *Crear documento:* Esta opción sirve para cargar archivos desde la computadora que pueden ser visualizados o descargados. Es importante revisar que los archivos ejecutables no contengan algún virus informático que vulnere al usuario final y no viole las normas de copyright.
- *Añadir archivo:* Esta opción sirve para cargar archivos desde la computadora que pueden ser visualizados o descargados. Es importante revisar que los archivos ejecutables no contengan algún virus informático que vulnere al usuario final y no viole las normas de copyright.
- *Añadir aplicación:* Una de las características más interesantes de Graasp es la cantidad de aplicaciones que puede utilizar. El usuario puede ingresar una aplicación desde una URL o elegir una aplicación de Go-Lab. Las aplicaciones pueden insertar herramientas didácticas virtuales como calculadoras, chats, mapas conceptuales, entre otros.
- *Añadir laboratorio:* Finalmente, el recurso de laboratorios permite incrustar experimentos virtuales y remotos que estén

en la nube. Para cada ciencia e ingeniería existe un laboratorio que puede utilizar en su entorno de aprendizaje.

El proceso de creación del entorno Graasp antes de migrar a Go-Lab, debe, como mínimo realizar la creación de un espacio y haber cargado material para sus estudiantes. En la Fig. 2 se muestra la estructura organizacional del ILS. Las características presentes en Graasp entre aplicaciones propias y las opciones de incrustar texto en HTML y diferentes formatos dan liberta en la creación del espacio. Los Nodos centrales siempre finalizan en los subescenarios.

B. ILS para Teoremas de Conservación

Evaluando los escenarios de aprendizaje del modelo ABT del curso Física General descrito en la Tabla I, se decide crear un ILS Go-Lab sobre Conservación de la Energía aplicado en el *Momento Intermedio>Tarea 3>Teoremas de Conservación,* cuyo objetivo principal es reforzar los conceptos teóricos de energía cinética, potencial y conservación de la energía a través de experimentos virtuales y remotos.

El recurso tendrá acompañamiento sincrónico y asincrónico durante las cuatro (4) semanas de implementación a través de los escenarios de acompañamiento tutor-estudiante representados en la Fig. 1. El Graasp de Conservación de energía se construye basado en la Fig. 2, eligiendo la opción de inicio C*rear* ILS, seguido de *Basic scenario.*

Al elegir el escenario básico, se crean de forma predeterminada siete (7) subescenarios sin contenido de igual formato, cinco de ellos corresponden a las fases principales del ABI (*Orientación, Conceptualización, Investigación, Conclusión y Discusión)* discutidas en la Introducción y dos (2) tableros adicionales *Student Dashboard y Teacher Dashboard.* cuyos objetivos están orientados en brindar visualización del progreso del estudiante y recursos para seguimiento académico respectivamente. En la Fig. 3 se visualiza el Diagrama de Flujo Web del espacio. Cada una de las fases de ABI cuentan con recursos pedagógicos que responden a las necesidades de cada fase

En la fase de *Inicio,* se describe el espacio, los contenidos OVA (Objetos Virtuales de Aprendizaje), el equipo de desarrolladores, un formulario de registro y una aplicación que muestra los usuarios en línea dentro del espacio en tiempo real.

En *Orientación,* el estudiante abordará de manera inicial el concepto de energía a través de un vídeo, seguido, deberá realizar una prueba tipo POC de treinta y cinco (35) preguntas sobre los presaberes necesarios antes de abordar los temas de conservación de la energía. Luego, el estudiante encontrará recursos audiovisuales y laboratorios virtuales sobre los temas que, a la fecha, ya han abordado en la metodología ABT del curso de Física General (momento 1 y 2).

La siguiente fase de *Conceptualización* se abarca desde los objetivos de aprendizaje y los contenidos temáticos del Momento 2, Tarea 3: Energía Cinética, Energía Potencial, Conservación de la energía mecánica, fuerzas conservativas, potencia. Se incluye un contenido temático adicional sobre la herramienta computacional recomendada para el desarrollo de los cursos: Introducción a Matlab/Octave. Al final el estudiante encontrará enlaces que lo dirigirán a material de apoyo bibliográfico adicional al presentado en el recurso.

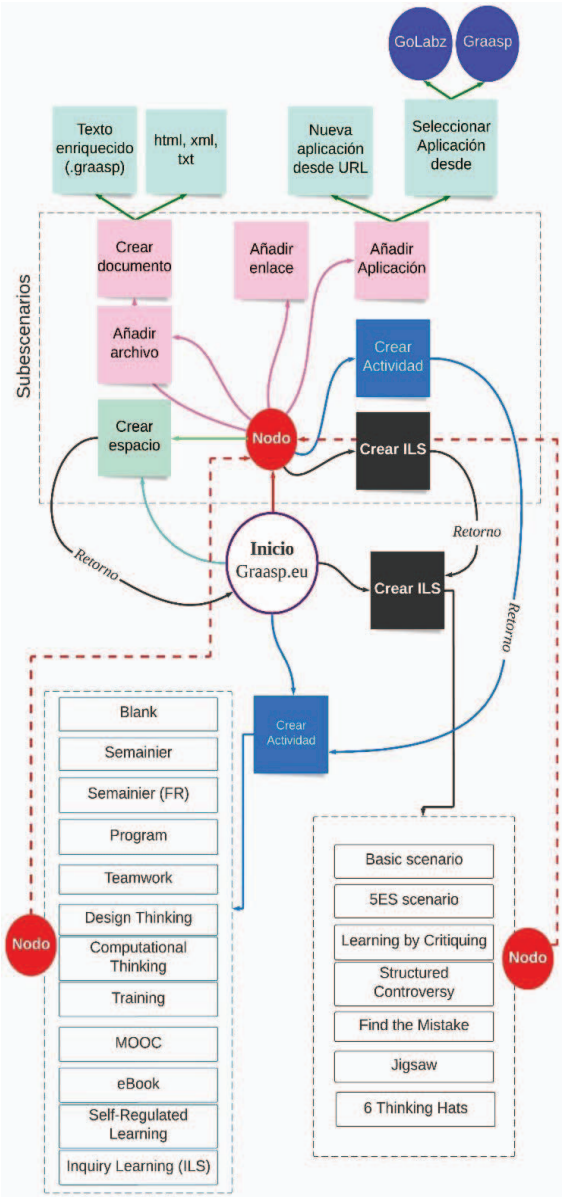


Fig. 2. Estructura básica del Grassp. El Nodo indica los puntos de retorno y común entre los diferentes subescenarios.

La etapa de *Investigación* corresponde a la implementación de tres prácticas virtuales y remotas. El estudiante deberá revisar cada uno de los recursos del escenario, podrá descargar el formato de informe de laboratorio de cada práctica de laboratorio, revisar los video tutoriales de instalación de cada software y uso de las herramientas y subir en cada espacio específico los resultados de la práctica. A continuación, se explica en qué consiste cada práctica:

La primera actividad consiste en el uso de un espacio multi-física realista basado en una caja de arena (sandbox), laboratorio remoto, en el cual, el profesor podrá desarrollar un entorno experimental basado en el diseño de la actividad práctica. La riqueza de Algodoo frente a otras cajas de arena,

es de acceso libre, multiplataforma, funciona para equipos MAC/Windows/Linux y su instalación es simple. La práctica consiste en un problema de un sistema masa-resorte que deberá construir según la indicación de la guía de informe y deberá evaluar el comportamiento de la energía en cada simulación.

La segunda práctica experimental corresponde al uso de un simulador web PhET, el cual es un espacio libre, gratuito de acceso online de formato incrustado en HTML5 (desde 2021 no es necesario descargar). Cuenta con una gran variedad de experimentos de física, química y biología, que responden a las exigencias experimentales de laboratorios virtuales.

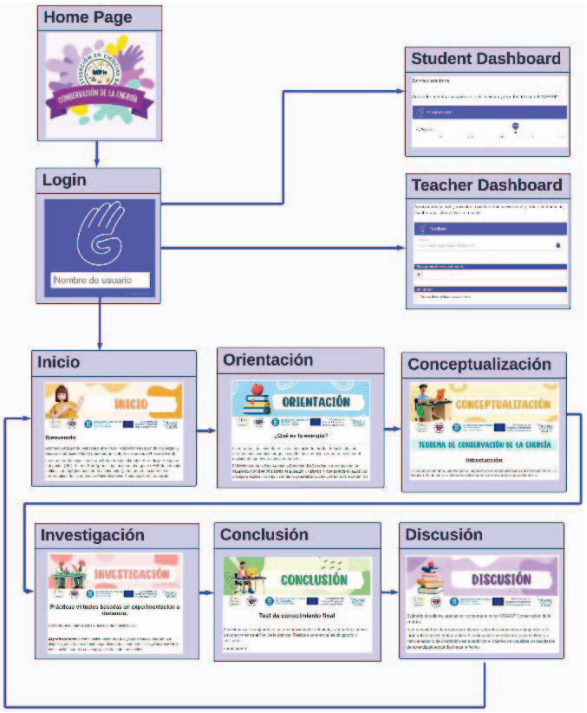


Fig. 3. Diagrama de flujo Web del GoLab: Conservación de la energía.

Finalmente, la tercera práctica está basada en un laboratorio remoto, este último, se diferencia de los laboratorios virtuales al ser un entorno de aprendizaje guiado y único, el estudiante podrá controlar el experimento a distancia como si estuviese en un espacio físico in-situ realizando la experiencia. El laboratorio remoto *World Pendulum Alliance* consiste en una constelación de péndulos conectados alrededor del mundo que son controlados a distancia desde el software de equipo e-Lab, en esta parte, el estudiante deberá usar Matlab u Octave para obtener las gráficas de movimiento partiendo de los conceptos de conservación de la energía.

En *Conclusión,* se realiza un test de conocimiento final a través de una prueba tipo POC de treinta (30) preguntas de única opción sobre los temas vistos en el recorrido de las cuatro etapas previas.

La última etapa del ABI se muestra en el escenario *Discusión.* Allí se presenta un espacio de reflexión entre todos los participantes motivando la interacción entre los estudiantes y profesores de manera sincrónica y asincrónica. La primera actividad que deberá desarrollar el estudiante consiste es un mapa conceptual que contendrá los aportes conceptuales de todos los participantes, un chat de interacción público y una caja de observaciones.

Finalmente, en los escenarios de *Student Dashboard* el estudiante podrá visualizar la barra de progreso de la actividad de las fases ABI, un tablero de notas de apoyo, un espacio para preguntas al tutor y un cuadro de observaciones y el *Teacher Dashboard* escenario habilitado únicamente para el profesor, podrá hacer seguimiento de cada estudiante y sus actividades.

Resultados y Discusión

Al tener construido y finalizado el recurso, se publicó el recurso Graasp en Go-lab con el nombre Conservación de la Energía a través de una licencia libre CC BY-NC-ND. La URL del sitio se presenta en [13].

La Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) se desarrollan los programas a partir de un campus virtual, en donde el estudiante ingresa y puede verificar los cursos que ha inscrito durante el periodo académico; en este espacio podrá encontrar el curso de Física General; en el cual se establecen diferentes actividades para que el estudiante adquiera las habilidades necesarias basados en el propósito de formación: *Comprende las leyes de la física clásica y los principios de la experimentación para la creación de un pensamiento científico que permita la solución y análisis de situaciones reales.* Este plan piloto se plantea dentro de la tercera actividad del curso, la cual se refiere al conocimiento de la conservación de la energía, cuyo objetivo de aprendizaje: *implementar los principios de conservación de la Energía en situaciones cotidianas*; la herramienta tecnológica en Go-Labz a implementar en esta actividad, se espera mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje del estudiante y conseguir el propósito general del curso.

La prueba piloto del ILS se realiza en el periodo académico 16-02 (abril-julio) del curso de Física General de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Inicialmente, se establece una muestra de quinientos ochenta y dos (582) estudiantes en total; de los cuales ciento cuarenta y seis (146) son mujeres y cuatrocientos treinta y seis (436) hombres. La edad de la población se encuentra en el intervalo de 17 a 69 años. En la Fig. 3 se presenta la participación de los estudiantes en porcentaje según su participación por zona, resaltando la mayor población de estudiantes se concentra en la Zona Centro Bogotá Cundinamarca (ZCBC) con un total del 32% y la menor se concentra en la Zona Sur (ZSUR) con un 6%. Los docentes encargados de realizar el seguimiento de esta actividad fueron cinco (5) profesionales en física con formación de maestría en ingeniería física y electrónica.

A lo largo del semestre, antes de iniciar con el *Momento intermedio>Tarea 3*: *Teoremas de conservación,* doscientos treinta y siete (237) son eliminados de la muestra por cancelación de semestre, abandono o ausencia durante las actividades, reduciendo la población objetivo a trescientos cuarenta y cinco (345) estudiantes, sobre esta muestra, se realiza la implementación del recurso educativo.

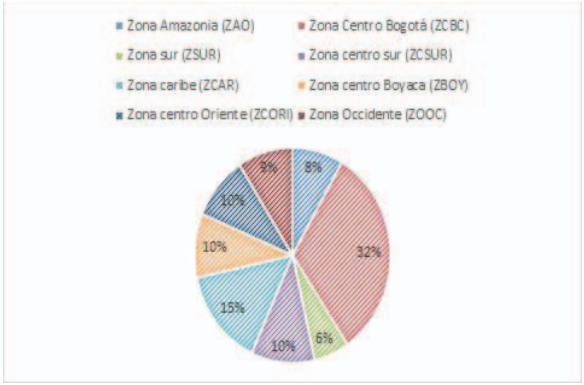


Fig. 3. Distribución de la muestra de estudiantes del curso de Fïsica General a lo largo del país.

En la Fig. 4 se evidencian los resultados de aprobación en la implementación del Go-Lab sobre la población final, el 26% no presentó, el 6% reprobó y el 68% aprobó. Si se descarta la población que no participó en el desarrollo del ILS, aprobaron la actividad el 91.4%, resaltando el éxito del desarrollo de la actividad de los 234 estudiantes restantes.

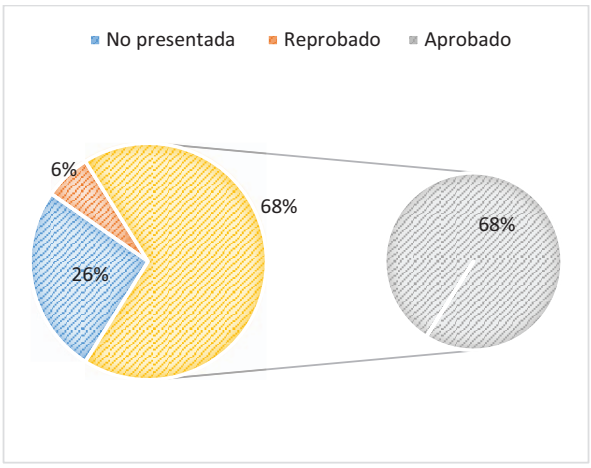


Fig. 4. Resultados de la aprobación de la Tarea 3 del momento intermedio después de la implementación del Go-Lab de Conservación de la energía.

Adicionalmente, a la aprobación se realizó el análisis cualitativo de las respuestas al cuestionario abierto sobre percepción en cuanto al uso de la tecnología en las ciencias realizado al iniciar la actividad. Se realizaron tres preguntas en donde los estudiantes muestran su apreciación sobre el papel de la tecnología en el proceso de enseñanza de las ciencias naturales (Física, química y biología); de estas preguntas se tienen los siguientes resultados:

Primera pregunta: ¿Cuál considera usted que es el papel que juega la Tecnología en el estudio de las ciencias Naturales? (Física, Química y Biología).

Los resultados del análisis cualitativo para esta pregunta demuestran una tasa de respuesta positiva del 78,7%, en donde los estudiantes muestran favorabilidad respecto al papel de la tecnología en el estudio de las ciencias, mencionando que la tecnología es una herramienta fundamental pues permite simular fenómenos naturales a partir del uso de software mejorando las mediciones de diferentes variables, facilitando de esta manera el acceso a estudios e información generalizada y la comprensión de nuevos hallazgos científicos. Sin embargo, dentro de estas apreciaciones también se considera que la tecnología no supera el papel del docente en un salón de clases. También se presenta una tasa del 23,5% de los estudiantes que responden sin ningún contexto referente a la pregunta.

Segunda pregunta: ¿Qué dificultades, si las hay, presenta a la hora de estudiar un curso, utilizando tecnología?

Los resultados del análisis cualitativo respecto a esta pregunta se enfocan en tres ítems; el primero se relaciona con los estudiantes que responden a las diferentes dificultades que tienen usando tecnología en algún curso lo que corresponde al 69,2% de la muestra; aquí mencionan con recurrencia que las dificultades son: no tener internet pues la cobertura no es estable en algunos sitios del país, en ocasiones no hay un acompañamiento oportuno para dar una explicación sobre el manejo de los recursos tecnológicos y por último no contar con suficiente tiempo para explorar cada una de las herramientas de tal manera que se dé el uso correspondiente. El segundo ítem corresponde a los estudiantes que no muestran ninguna dificultad al usar tecnología a la hora de estudiar un curso lo cual corresponde al 21,4% y el tercer criterio corresponde a los estudiantes que contestaron sin ningún contexto relacionado con la pregunta siendo el 9,4 % por ciento de la muestra.

Tercera pregunta: Para usted ¿Qué es lo más complejo de un experimento de Física?

Los resultados del análisis cualitativo de esta pregunta demuestran una tasa del 83% que mencionan que lo más complejo de un experimento de Física es obtener los resultados esperados considerando la comprobación de la teoría en el laboratorio; sin embargo, el 6% por ciento de la muestra indica que lo más complejo es la realización del informe de laboratorio lo cual muestra que los estudiantes no tienen un conocimiento significativo sobre los pasos que debe seguir para realizar un informe que dé cuenta de los resultados que se obtienen en el laboratorio y el 11% por ciento corresponde a los estudiantes que responden sin ningún contexto en relación con la pregunta.

En conclusión, la prueba piloto presentó resultados positivos frente a la construcción e implementación del ILS por parte de los profesores y estudiantes. Se debe resaltar la favorabilidad de los estudiantes en el uso de la tecnología, sin embargo, el docente debe ser garante de un proceso correcto en su uso para lograr mejores resultados de aprendizaje. Se destaca también, que aún hay regiones del país donde el acceso de internet es limitado. En un futuro trabajo deberá discutirse la validez de la implementación frente a una evaluación por pares académicos, creación de un instrumento

de evaluación a estudiantes al aplicar el espacio en diferentes periodos académicos y realizar un análisis pedagógico frente a las respuestas.

ACKNOWLEDGMENT

Agradecemos el apoyo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y la Universidad de Catalunya por el apoyo en la creación e implementación del ILS, la escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI, al curso de Física General y los profesores de la red de Física quienes apoyaron en los procesos de implementación a los más de mil estudiantes del curso y finalmente, al proyecto World Pendulum Alliance, que incentivó la divulgación de los laboratorios remotos y la capacitación del recurso. El proyecto WORLD PENDULUM ALLIANCE es cofinanciado por el programa Erasmus+ de la Unión Europea mediante el convenio de subvención 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

REFERENCIAS

[1] A. Mera-Mosquera y J. Mercado-Bautista, «Educación a distancia: Un reto para la educación superior en el siglo XXI,» *Dominio de las Ciencias,* vol. 5, nº 1, pp. 357-376, 2019.

[2] C. E. Bilbao, L. M. Velásquez, D. L. Martínez y A. Fernández, «Análisis del contexto e-learning en la UNAD. Una mirada desde los entes tecnológico, social y pedagógico.,» *Revista de Investigaciones UNAD,* vol. 11, nº 1, pp. 107-131, 2012.

[3] R. Heradio, L. de la Torre y D. Galan, «Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis,» *Computers & Education,* vol. 98, pp. 14-38, 2016.

[4] J. Afanador, Educación vitualidad e innovación: Estudio de caso para la consolidación de un modelo de liderazgp en la eduación incluyente y de calidad, Bogotá: Sello editorial UNAD, 2021.

[5] M. R. C. A. C. M. C. S. G. L. J. .. &. F. H. Santos, «World Pendulum Alliance,» *2019 5th Experiment International Conference (exp. at'19),* pp. 272-273, Junio 2019.

[6] F. G. D. S. R. G. N. N. A. M. N. &. K. I. Coenders, «GO-GA: Class experiences with offline inquiry learning spaces in go-lab,» *2020 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE),* pp. 55-62, 2020.

[7] A. Torres-Toukoumidis, M. Caldeiro-Pedreira y M. Mäeots, «Aprendizaje basado en la indagación en el contexto educativo español.,» *Luz,* vol. 19, nº 3, pp. 3-18, 2020.

[8] M. Pedaste, M. Mäeots, L. A. Siiman, T. De Jong, S. A. Van Riesen, E. T. Kamp y E. Tsourlidaki, «Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle,» *Educational research review,* vol. 14, pp. 47-61, 2015.

[9] S. Govaerts, Specifications of the Go-Lab, Portal and App Composer., 2013.

[10] E. L. Martínez Piñeiro, «¿ Laboratorios experimentales en la educación a distancia? Una alternativa práctica empleando Graasp y Go-Lab.,» *Revista Mexicana de Bachillerato a Distancia,,* vol. 13, nº 25, 2021.

[11] D. Tique, «Syllabus curso Fisica General 100413,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Bogotá, 2022.

[12] M. Escondria, Comprensión de lectura en lengua, México D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

[13] A. H. A. V. D. G. Maria Jesús Rodríguez-Triana, «Orchestrating Inquiry-Based Learning Spaces: an Analysis of Teacher Needs,» *14th International Conference on Web-based,* pp. 1-10, 2015.

[14] M. Perazzo, «La importancia de los foros virtuales en los procesos educativos,» *Campus Virtual UNLa,* p. 1, 13 10 2015.

[15] F. T. Payoma, A. Cifuentes, D. Herrera, L. Neira, F. Alpiste y G. Gonzalez, «Go-Lab: Conservación De La Energía,» Next-Lab - Next Generation, 2022. [En línea]. Available: https://www.golabz.eu/ils/conservaci%C3%B3n-de-la-energ%C3%ADa.

[16] M. Christodoulidou, «Inspiring pupils in STEM through Inquiry Learning Spaces (ILSs): The "Scientists in Arctic Pole" ILS example,» *Geophysical Research Abstracts,* vol. 20, 2018.

[17] D. H. K. T. L. N.-Q. Freddy Torres-Payoma, «Computing the gravitational acceleration within the World Pendulum Alliance: an application of,» 2022.

[18] Y. V. Jerez Naranjo y A. A. Garófalo Hernandez, «Aprendizaje basado,» 2012.

[19] Y. V. Jerez Naranjo y A. A. Garofalo Hernandez, «Aprendizaje basado en tareas aplicado a la enseñanza de la Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica, Automática y comunicaciones,» nº 33, pp. 1-7, 2022.

[20] D. y. C. R. Nunan, The Cambridge Guide to Teaching English to Speakers of Other, London : Cambridge University y Press , 2010.

[21] E. Patricia, «Aprendizaje por Indagación,» *Fundación Omar Dengo,* 2015.

[22] A. E. Medina, «APRENDIZAJE BASADO EN TAREAS EN UN ENTORNO VIRTUAL DE APRENDIZAJE PARA EL DESARROLLO DE PRODUCCIÓN ESCRITA EN ALEMÁN, NIVELES A1 Y A2 MCER,» *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación,* nº 53, pp. 61-78, 2018.

Computational thinking, a discipline to enhance digital skills such as programming.

Pensamiento computacional, una disciplina para mejorar habilidades digitales como la programación.

Yen Caballero-González
Instituto Técnico Superior Especializado (ITSE)
ycaballero@itse.ac.pa
Universidad de Salamanca, Facultad de Educación
Grupo de Investigación en Innovación y Educación Digital (EduDIG)
Orcid: 0000-0002-7493-6683

***Abstract*—This document presents the results of the development of a learning program on computational thinking through programming challenges with robots oriented to early childhood. The methodological approach used was quantitative, using a quasi-experimental design, taking pretest/posttest measures, with experimental and control groups. The sample of participating students was 46. They belonged to a group of first grade of primary education, aged between 6 and 7 years, in a Spanish educational center. The learning of computational thinking was measured through the following dimensions: algorithmic thinking-sequences, abstraction-patterns and debugging. The learning activities used were an adaptation of the activities proposed in the "TangibleK" robotics curriculum. The results generated show positive effects in relation to the level of achievement reached by the students in the proposed challenges; in other words, there is a significant effect on the mastery of skills related to computational thinking. Differences were found between the pretest and posttest measures of the experimental group. Those of the latter group were statistically significant and higher than those of the control group. Therefore, we can statistically attribute the mastery of computational thinking skills to the participation in the training activities.**

Keywords*— *learning, teaching, education, information society, computing

***Resumen* — Este documento presenta los resultados que arrojó el desarrollo de un programa de aprendizaje sobre pensamiento computacional mediante retos de programación con robots orientado a niños de edad temprana. El enfoque metodológico utilizado fue de tipo cuantitativo, mediante un diseño cuasi-experimental, tomando medidas pretest/postest, con grupo experimental y control. La muestra de estudiantes participantes fue de 46. Pertenecientes a un grupo de primero de educación primaria, con edades entre 6 y 7 años, en un centro educativo español. El aprendizaje del pensamiento computacional se midió a través de las dimensiones: pensamiento algorítmico-secuencias, abstracción-patrones y depuración. Las actividades de aprendizaje que se utilizaron fueron una adaptación de las actividades propuestas en el programa de estudio en robótica "TangibleK". Los resultados que se generaron muestran efectos positivos en relación con el nivel de logro alcanzado por los estudiantes en los retos propuestos; es decir, se manifiesta un efecto significativo en el dominio de habilidades vinculadas al pensamiento computacional. Se encontraron diferencias entre las medidas pretest y postest del grupo experimental. Siendo las de este último grupo estadísticamente significativas y superiores a las que presenta el grupo control. Por lo cual, estadísticamente podemos atribuir el dominio de las habilidades de pensamiento computacional a la participación en las actividades formativas.**

Palabras claves* —*aprendizaje, enseñanza, educación, sociedad de la información, informática

I. INTRODUCTION

En los últimos veinte años la tecnología en forma general y las denominadas TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) han moldeado los procesos y actividades que se desarrollan en los diversos sectores de la sociedad. Por otro lado, en el ámbito educativo la disrupción que han provocado tecnologías como la Inteligencia Artificial, el Internet de las Cosas (IoT), el Big Data, la Robótica, bajo un enfoque orientado al estudiante, está contribuyendo a fortalecer la motivación y el interés del participante en las actividades de aprendizaje que conforman el proceso 0.

En consecuencia, la visible integración tecnológica que experimentamos tiene un efecto directo en nuestra vida. Este hecho, plantea nuevos retos y paradigmas asociados a las formas de aprender y generar conocimiento. Estamos inmersos en lo que, algunos autores, denominan la revolución digital [2]. Lo que facilita la interacción del individuo con la realidad, observando los resultados de forma tangible, favoreciendo el desarrollo del pensamiento crítico y transformando las habilidades desarrolladas en competencias más perdurables[3].

La estructuración de este nuevo escenario para los contextos de aprendizaje de vanguardia focaliza su atención en el desarrollo de un modelo educativo que coloca al estudiante como elemento clave del proceso. Por otro lado, el uso de las tecnologías y los recursos digitales en las actividades educativas implica, proveer las condiciones necesarias para realizar las acciones formativas, la gestión y todos los procesos que conlleva la enseñanza-aprendizaje.

En este sentido, se le asigna a la tecnología un rol de responsabilidad en las necesidades educativas que plantea la sociedad. "Al hacer de ellas una forma y un contenido con características didáctico-pedagógicas para el proceso de enseñanza y aprendizaje"[4].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00061

En la sección II de este documento, denominada Contexto, se presenta un breve marco referencial que provee una base teórica para el desarrollo de estudio. La sección III presenta el objetivo que persiguió el estudio. Además, se presenta la metodología y recursos utilizados. Lo relacionado a los principales resultados del análisis desarrollado se muestran en la Sección IV. El documento finaliza con la sección de conclusiones y referencias.

II. Contexto

A. *Pensamiento Computacional: una competencia necesaria para un mundo digital*

El Pensamiento Computacional (en adelante PC) se convertido, actualmente, en una de las corrientes formativas y de aprendizaje sobre alfabetización tecnológica más importantes, logrando capturar el interés y la atención de científicos y especialistas en importantes foros académicos, empresariales y de investigación [5]. Uno de los campos de aprendizaje que han mostrado una fuerte adopción de actividades de enseñanza-aprendizaje sobre PC es la educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (por sus siglas en inglés STEM).

Se reconoce a Seymour Papert, destacado científico computacional y pionero de la inteligencia artificial, como el primero en emplear formalmente el término «pensamiento computacional» en su trabajo titulado Mindstorms [6]. Sin embargo, se atribuye a Jeannette Wing la utilización y descripción más completa y profunda del término, a través de su artículo «Computational Thinking»[7].

El aprendizaje del PC permite fortalecer la capacidad de resolver problemas y diseñar sistemas, basados en los conceptos fundamentales de la computación [7]. En 2008, Wing expreso: «El pensamiento computacional influirá en todos los campos de actividad, lo que supondrá un nuevo reto educativo para nuestra sociedad, especialmente para nuestros hijos» [8].

Posteriormente, en 2009 la National Science Foundation apoyó económicamente la realización del proyecto: Leveraging Thought Leadership for Computational Thinking in PK-12. Este fue una iniciativa que se desarrolló conjuntamente entre la Computer Science Teachers Association (CSTA) y la International Society for Technology in Education.

La iniciativa permitió que los conceptos asociados al PC fueran accesibles a los educadores, proporcionó una definición operativa, un vocabulario compartido y ejemplos significativos adecuados a la edad de los estudiantes. En el proyecto se vinculaban los objetivos educativos y las prácticas de aula[9]. Las grandes firmas tecnológicas también han volcado su interés en desarrollar iniciativas vinculadas al PC. Un claro ejemplo fue el caso de la internacional Google. En el 2010 este gigante tecnológico lanzó el sitio web Exploring Computational Thinking que contenía una gran cantidad de enlaces a otros recursos de la web, incluyendo planes de lecciones para profesores de ciencias y matemáticas orientadas a niveles K-12.

En Europa, desde el año 2012, la comunidad científica ha liderado la discusión sobre la integración de estrategias de formación sobre habilidades de pensamiento computacional incluidas en el currículo escolar. Para esto se han presentado varios informes que reconocen el valor de la informática como una disciplina de conocimiento equiparándola al nivel de las matemáticas o el aprendizaje de las lenguas . Algunos de los informes que se han desarrollado incluyen los presentados por: la Royal Society en el Reino Unido, la Academie des Sciences en Francia, la Sociedad Científica Informática de España y la Association of Computing Machinery – Europe [10].

Además, en esta región se ha realizado el proyecto Erasmus+ KA2 «TACCLE3–Coding». Una iniciativa que proporcionaba contenidos, prácticas y experiencias para desarrollar exitosamente el PC y habilidades de codificación en distintos niveles educativos[11].

En Asia, se promovió la iniciativa Smart Nation (Digital News Asia, 2015) el proyecto permitió llevar la tecnología a los centros de educación infantil, un ejemplo fue el programa «PlayMaker» que se desarrolló en Singapur. En este programa se realizaron experiencias formativas para lograr el aprendizaje de la codificación, como estrategia, para el desarrollo de habilidades digitales en niños desde la infancia temprana.

Otra línea de acción, de gran impacto, utilizada para el desarrollo de los procesos de aprendizaje asociados al dominio del PC fue la iniciativa «Computing at School» por las siglas en inglés (CAS). La iniciativa fue el producto de una alianza donde participaron el Ministerio de Educación del Reino Unido, universidades, investigadores y empresas privadas vinculadas al sector tecnológico e informático de este país. El propósito de esta propuesta fue promover y apoyar la excelencia en la educación en Ciencias de la Computación dentro del sistema británico y surgió en el contexto de planificación, diseño e implementación del nuevo currículo educativo que se originó en el 2013 y se introdujo durante el curso 2014-2015 [12].

Para 2016 en los Estados Unidos, bajo la administración del presidente Barack Obama, se impulsó el proyecto denominado «Computer Science for all» Ciencias de la Computación para todos. La estrategia buscaba que todos los estudiantes del país, desde la educación Infantil hasta secundaria, lograsen aprender ciencias de la computación y adquirieran habilidades de PC necesarias para convertirse en creadores, dentro de una economía digital, activa y altamente competitiva .

El PC es un área de interés y conocimiento con fuerte expansión a nivel conceptual y operacional. Una de las aportaciones de gran valor en referencia al marco conceptual del PC lo realizaron los investigadores Karen Brennan y Mitch Resnick. La propuesta que formularon se denominó “Computational Thinking Framework” y representa un marco de referencia para su aprendizaje y desarrollo. La propuesta presentaba al PC articulado en tres dimensiones: los conceptos, las prácticas y las perspectivas [13].

Otro de los enfoques que se le atribuye al término PC es para hacer referencia al conjunto de ideas, conceptos y principios vinculados a las áreas de ciencias computacionales e informática. Concretamente, “se trata de un proceso de pensamiento (o una habilidad de pensamiento humana) que usa enfoques analíticos y algorítmicos para formular, analizar y resolver problemas” [14].

Atendiendo a los nuevos requerimientos y dominios cognitivos que impulsa la sociedad de la información y el

conocimiento a través del marcado uso de las tecnologías digitales, Bers (2017), considera necesario que los ciudadanos del siglo XXI aprendan a «codificar» y «programar» para ser productores digitales de información, no solo consumidores de datos e información en un mundo digital. Además, considera que es importante diferenciar los conceptos «codificación», «programación» y «pensamiento computacional», pese a que frecuentemente se utilizan de forma indistinta en los procesos asociados al desarrollo del PC [15].

En un acercamiento conceptual más estructurado sobre PC, Bers (2017), lo presenta como la capacidad de usar los conceptos de la informática para formular y resolver problemas, para lo cual se estructura y se requiere utilizar un conjunto más amplio de habilidades como el análisis de problemas y pensamiento algorítmico, entre otras. Además, argumenta su exploración, desarrollo y apropiación desde áreas centrales de dominio cognitivo como la abstracción, algoritmo, automatización, descomposición, depuración y generalización [16].

Igualmente, la autora, expresa que existe un vínculo directo entre esta forma de pensamiento y el desarrollo de la "competencia digital"; es decir, visualiza al PC como una forma del pensamiento analítico que presenta similitudes con el pensamiento matemático (por ejemplo, en la resolución de problemas), el pensamiento de ingeniería (a través del diseño y evaluación de procesos) y el pensamiento científico (aplicado mediante la realización de un análisis sistemático) [17].

Por otro lado, Bers y su equipo de trabajo han realizado significativos aportes de tipo experimental donde se presentan los beneficios de introducir actividades para el aprendizaje del PC en niños desde la infancia temprana. Los aportes presentan el aprendizaje del PC mediante el dominio de 7 poderosas ideas como: los algoritmos, modularidad, las estructuras de control, representación, hardware/software, proceso de diseño y depuración [16].

B. Enfoques para evaluar el aprendizaje del pensamiento computacional

El aprendizaje del pensamiento computacional junto con la codificación y programación representan algunos de los focos de interés más activos en relación con el desarrollo de habilidades digitales necesarias para el siglo XXI. Sin embargo, aún no se tiene en la comunidad científica internacional un criterio definitivo sobre su conceptualización, su influencia en áreas de contenido y saberes específicos y los mecanismos de evaluación más propicios.

Recientemente, se han presentado nuevos enfoques con el propósito de fortalecer el desarrollo de competencias y habilidades digitales focalizados a contextos educativos de los primeros años de educación formal. Bajo estas orientaciones se toman en cuenta propuestas con un diseño instruccional basado en actividades y recursos sencillos o desenchufados lo cual amplia el rango de aplicación de esta creciente área de conocimiento [18].

Por otro lado, un aspecto importante que habría que destacar es el impacto que representa, el PC, en los diferentes escenarios de aprendizaje como dominio cognitivo, técnico y actitudinal.

C. Tecnologías y recursos educativos utilizados en el aprendizaje del Pensamiento Computacional

En los últimos años los procesos de enseñanza-aprendizaje asociados al desarrollo de habilidades sobre PC se han caracterizado por un marcado interés en el diseño e implementación de estrategias para su desarrollo, desde una edad temprana. Lo que de acuerdo al literatura científica permitiría sentar las bases para el desarrollo de una verdadera alfabetización digital, robusteciendo los atributos de las personas, las instituciones y empresas que componen la sociedad del siglo XXI.

Esto sugiere que las estrategias de enseñanza-aprendizaje dirigen su atención hacia el desarrollo e implementación de iniciativas que contribuyan a lograr que los estudiantes adquieran competencias vinculadas a la resolución de problemas, el pensamiento crítico, la programación y otras habilidades de tipo social como: la colaboración, comunicación y liderazgo necesarias para desempeñarse exitosamente en la denominada sociedad digital [16].

Las nuevas interfaces tangibles para el aprendizaje, como los robots programables, están ganado popularidad entre académicos, investigadores e instituciones educativas. En este sentido, [19]consideran que "La robótica es un recurso educativo mediante el cual se pueden impartir contenidos de distintas áreas a la vez (enseñanza interdisciplinar), adecuando las actividades a las características de los estudiantes.

Por su parte [20], argumentó que la robótica educativa parte del principio piagetiano de que no existe aprendizaje si no hay intervención del estudiante en la construcción del objeto de conocimiento. En este mismo hilo de ideas, [21]sostiene que la RE "tiene por objeto poner en juego toda la capacidad de exploración y de manipulación del sujeto cognoscente al servicio de la construcción de significados a partir de su propia experiencia educativa".

Trabajos recientes desarrollados por [22]expresan que la RE es una herramienta novedosa para el contexto educativo con aportes diversos y significativos. Además, despierta el interés y abre la posibilidad de que el estudiante adquiera habilidades creativas. Esta disciplina de conocimiento busca principalmente estimular el interés de los estudiantes y conducirlos a través de desafíos o retos a la creación de esquemas de pensamiento que faciliten de manera progresiva la estructuración del pensamiento lógico y formal.

En definitiva, podemos sostener que según la literatura consultada la RE despunta, como una de las tecnologías educativas de mayor aplicación para lograr avances significativos en el dominio y aprendizaje de características propias de las dimensiones que integran el PC.

III. OBJETIVO, METODOLOGIA, RECURSOS

En los últimos años existe un aumento en el número de proyectos y estudios vinculados al desarrollo de habilidades y competencias propias de la programación, el pensamiento computacional y el dominio en las disciplinas STEAM. Por otro lado, cada vez más se potencia el hecho de lograr el

desarrollo de este tipo aprendizajes desde una edad temprana [15] Sin embargo, este campo de investigación aún necesita incorporar más estudios experimentales que funjan como evidencia científica.

A. Objetivo

El estudio que se desarrolló y que se presenta en este documento tenía como propósito valorar el desempeño de los estudiantes participantes en un programa de formación para fomentar el aprendizaje del pensamiento computacional y la programación. Para esto se utilizó actividades mediadas con robótica educativa.

La pregunta de investigación que se estableció en el estudio se focalizó en determinar el efecto que originaba, el desarrollo del programa formativo, en los estudiantes que participaron de la intervención. En específico la pregunta que se formuló consistió en:

- ¿Fortalecen los estudiantes sus habilidades de pensamiento computacional al participar de actividades de aprendizaje mediante retos de programación con robótica educativa?

B. Metodología

Para el desarrollo del estudio, documentando en este trabajo, se propuso un enfoque metodológico de tipo cuantitativo y un diseño cuasiexperimental con medidas Pretest/Postest y grupo control [23].

En el diseño de investigación se utilizaron dos tipos de variables: independientes y dependientes. La variable independiente fueron las actividades de aprendizaje que conforman el programa de formación [23]. Además, como variable dependiente se estableció las habilidades de pensamiento computacional desarrolladas en los estudiantes.

Explorando fundamentalmente el aprendizaje del pensamiento computacional de acuerdo con las tres dimensiones: pensamiento algorítmico (secuencias) abstracción-patrones y depuración, según las consideraciones propuestas por [24].

Las actividades que fueron propuestas en la intervención formativa se estructuraron en base a un total de 20 horas. Se realizaron 6 sesiones destinadas a las actividades de formación y aprendizaje con intervenciones de 2 horas cada una, para un total de 12 horas.

Las tres primeras sesiones se focalizaron en el diseño y programación de secuencias de movimientos de nivel básico. Las últimas tres sesiones (sesión 4 hasta la sesión 6) se aumentó la complejidad de las secuencias. Se realizaron dos sesiones de pruebas, mediante evaluaciones Pre y Postest, con 3 horas cada una; es decir, un total de 6 horas.

Las pruebas se basaron en la exploración de la característica secuencia del pensamiento computacional (ver Tabla 1), considerando la propuesta teórica denominada "Computational Thinking Framework" [24].

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL PENSAMIENTO COMPUTACIONAL INDAGADOS (CONCEPTOS Y PRÁCTICAS)

Dimensión	***Descripción***
Pensamiento Algorítmico-Secuencias	Capacidad orientada a lograr la estructuración de una serie de pasos ordenados (secuencia) que resuelven un problema concreto. En ciencias de la computación se le denomina a esto "Algoritmo".
Abstracción y Patrones	Descubrir los aspectos más importantes existentes en una narración que se les presenta. Esta característica se vincula con la resolución de problemas y el diseño algorítmico.
Depuración	Comprobar la eficiencia de los movimientos que integran una secuencia de pasos proporcionada. Se determinará la existencia de posibles errores y se promoverá la realización de mejoras para lograr una mejor propuesta en el desplazamiento del robot.

La muestra de estudiantes que participaron en las actividades de aprendizaje fue de 46, pertenecientes a dos clases del primer nivel de educación primaria. El centro educativo fue de tipo concertado ubicado en Salamanca, España, durante el curso académico 2017-2018. A todos los participantes se les informó de los objetivos del estudio y se obtuvo el consentimiento de los padres.

El rango de edad de los estudiantes estuvo entre los 6 y 7 años; es decir, que el 74% estaba en una edad de 6 años y el 26% en 7 años. En relación con la distribución de los estudiantes en los grupos, esta quedo configurada en 23 estudiantes ubicados en el grupo experimental y 23 en el grupo control.

La muestra estuvo equilibrada en lo referente al género. En cada uno de los grupos participaron 13 niñas y 10 niños. Lo que se representó en un 54% de los participantes de cada grupo eran niñas y el 44% fueron niños.

Las actividades de aprendizaje utilizadas en las pruebas pre y postest se basaron en la resolución de problemas a través de retos o desafíos de programación, llamados Solve-It. Los retos "Solve-It" empleados para el estudio contemplaron actividades que facilitaron realizar una evaluación del desempeño de los estudiantes, mediante el dominio de habilidades como la secuenciación, la abstracción, los patrones y la depuración [15].

C. Recursos

Para el desarrollo de las actividades de aprendizaje se utilizó el kit de robótica educativa de la compañía inglesa TTS, Bee-Bot®. Este recurso es considerador un robot de piso con forma de abeja. Lo cual, hizo que fuese un recurso educativo motivador y atractivo a los estudiantes.

El robot posee en su parte externa, superior, botones para programar los movimientos o desplazamientos (avance, retroceso, giros a la izquierda o derecha). Además, posee un botón que permite la ejecución de las instrucciones y otro para pausar la secuencia [13].

Para el estudio se preparó una serie de tapetes o alfombrillas que se utilizaron como escenario para el desplazamiento del robot (Fig. 1).

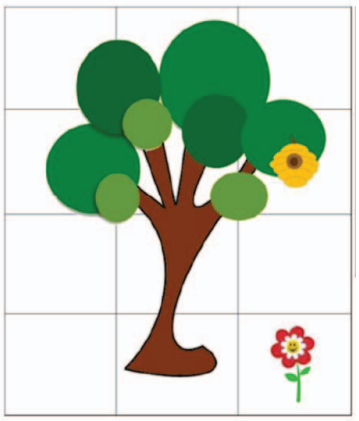


Fig. 1. Muestra de tapete utilizado en las actividades de aprendizaje

Para establecer el desempeño alcanzado por cada uno de los estudiantes en los diferentes retos propuestos, se utilizó como instrumento de medición una rúbrica. El instrumento fue una adaptación de la rúbrica SSS utilizada en el programa de estudio en robótica, TangibleK [11].

IV. Resultados

Para establecer cual fue el nivel de influencia que generó en los estudiantes el desarrollo de las actividades propuestas en las sesiones de intervención, se realizó un análisis a los datos recolectados mediante la aplicación de pruebas Pre y Pos-test.

La característica que se exploró fue secuencia que corresponde a la dimensión conceptual del pensamiento computacional [24]. La información recolectada se trató mediante técnicas de análisis cuantitativas, utilizando para ello el programa estadístico SPSS.

En este sentido, se efectuaron las pruebas estadísticas correspondientes para determinar la homogeneidad de los datos correspondientes a los grupos participantes. En este sentido, en la prueba de Levene para las variables correspondientes a las dimensiones de pensamiento computacional y el valor completo de la prueba se obtuvo un valor de p (Sig.) superior a ,05 por lo tanto se puede asumir la existencia de varianzas iguales en los datos correspondientes al Pretest en ambos grupos.

Además, se efectuó una prueba t para determinar la igualdad de medias, en la cual se observa una significación bilateral (Sig.) con valores mayores a ,05 para cada una de las dimensiones del pensamiento computacional y la prueba completa. Los resultados obtenidos luego de aplicar los análisis estadísticos nos permitieron comprobar que no existían diferencias significativas entre los grupos, es decir, los grupos son equivalentes al principio del estudio.

Para lograr medir la variable pensamiento computacional se utilizó, la misma prueba en la prueba pretest como en la postest. La prueba estuvo formada por retos o desafíos de programación, denominados Solve-It. En el caso de la aplicación de los estadísticos descriptivos al conjunto de datos obtenidos en la prueba postest, en la Tabla 2, se pueden observar los valores que se obtuvieron a través de la información.

TABLA 2.ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS EN EL POSTEST PARA EL GRUPO EXPERIMENTAL Y CONTROL.

Variable	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Post_Secuencia	Experimental	23	7,65	1,465	,305
	Control	23	6,61	1,530	,319
Post_Patrones	Experimental	23	8,04	1,461	,305
	Control	23	6,74	1,602	,334
Post_Depuración	Experimental	23	7,04	1,364	,285
	Control	23	6,00	1,314	,274
Prueba Completa	Experimental	23	22,74	3,493	,728
	Control	23	19,35	3,950	,824

Los resultados nos dan evidencia de una valoración superior en los valores de las medias obtenidas por los estudiantes del grupo experimental. En todos los casos los valores calculados para este grupo son más altos que las del grupo control. A continuación se aplicó la prueba t de Student sobre los datos recolectados en el postest para ambos grupos, experimental y control.

Los resultados que obtuvieron exponen la existencia de diferencias significativas en los valores calculados para cada una de las dimensiones de la variable explorada y en la prueba completa; es decir, en todos los casos la significación asintótica (Sig.) presenta valores inferiores al valor de referencia, es decir, una p<,05.

Los resultados presentados reafirman la diferencia de valores existente en los datos correspondientes al desempeño que obtuvieron los estudiantes en función del grupo al que pertenecen (experimental y control), siendo significativamente mayor en el grupo experimental ya que este fue el que recibió participó de la intervención.

Conclusiones

En relación con los valores que se obtuvieron luego de los análisis estadísticos correspondientes, con base a los datos recolectados se evidencia la existencia de diferencias estadísticas favorables a los participantes que participaron de las actividades de formación que estructuraron las intervenciones; es decir, el grupo experimental.

Se puede argumentar que existe una coincidencia con resultados presentados en estudios que han realizado otros investigadores. En los cuales se pone de manifiesto los beneficios que trae para el desarrollo de habilidades y competencias asociadas al pensamiento computacional y la programación, mediante la utilización de recursos como los robots programables [11][12][13].

El desarrollo del presente estudio representa una contribución a la base de conocimiento científico en relación con la posibilidad de lograr un desarrollo significativo de habilidades vinculadas al pensamiento computacional en estudiantes de primeros niveles educativos.

Toda vez que para el estudio se tomó como base una muestra de estudiantes de primero de Educación Primaria, cuya edad se localizaba en el rango de los 6 y 7 años.

REFERENCIAS

[1] J. Adell (2018). Más allá del instrumentalismo en tecnología educativa. Cambiar los contenidos, cambiar la educación. Madrid: Morata.

[2] M. Bers (2018, April). Coding, playgrounds and literacy in early childhood education: The development of KIBO robotics and ScratchJr. In Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2018 IEEE.

[3] E. F.M. & G. Cervera, M. (2011). El nuevo paradigma de aprendizaje y las nuevas tecnologías. Revista de Docencia Universitaria. REDU. Monográfico: El espacio europeo de educación superior. Hacia dónde va la Universidad Europea?. 9 (3), 55-73. Recuperado de http://redaberta.usc.es/redu.

[4] D. M. V. Barros (2012). Estilos de aprendizaje y las tecnologías: Medios didácticos en lo virtual. Saarbrücken: Editorial Académica Española.

[5] J. Valverde, M. Fernández y M. Garrido (2015). Computational thinking and the new ecologies of learning. RED - Journal of Distance Education, 46(3), 1-18. https://doi.org/10.6018/red/46/3.

[6] S. Papert (1980). Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas. New York: Basic Books.

[7] J. Wing (2006). Computational thinking. Communications of the ACM, 49(3), 33-35. https://doi.org/10.1145/1118178.1118215..

[8] J.Wing (2008). Computational thinking and thinking about computing. IPDPS Miami 2008 - Proceedings of the 22nd IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, Program and CDROM, (July), 3717-3725.

[9] D. Barr, J. Harrison & L. Conery (2011). Computational Thinking: A digital age skill for everyone. Learning and Leading with Technology, 38(6), 20-23.

[10] A. Sullivan, M. Bers & C. Mihm (2017). Imagining, playing, and coding with KIBO: using robotics to foster computational thinking in young children. Siu-cheung KONG The Education University of Hong Kong, Hong Kong, 110.

[11] F. J. García-Peñalvo. 2016. A brief introduction to TACCLE 3 –Coding European Project. In 2016 International Symposium on Computers in Education (SIIE 16), F.J. García-Peñalvo and J.A. Mendes Eds. IEEE, USA. DOI:10.1109/SIIE.2016.7751876.

[12] C. Chalmers (2018). International Journal of Child-Computer Interaction Robotics and computational thinking in primary school. International Journal of Child-Computer Interaction, 17, 93–100. https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2018.06.005.

[13] M. Chiara, D. Lieto, E. Inguaggiato, E. Castro, F. Cecchi, G. Cioni, P. Dario (2017). Computers in Human Behavior Educational Robotics intervention on Executive Functions in preschool children : A pilot study. Computers in Human Behavior, 71, 16–23. https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.01.018.

[14] C. Angeli, J. Voogt, A. Fluck., M. Webb, M. Cox, J. Malyn-Smith & J. Zagami (2016). A K-6 computational thinking curriculum framework: Implications for teacher knowledge. Journal of Educational Technology & Society, 19(3), pp. 47–57.

[15] A. Strawhacker, M. Lee & M. Bers (2017). Teaching tools, teachers' rules: exploring the impact of teaching styles on young children's programming knowledge in ScratchJr. International Journal of Technology and Design Education, 1-30. DOI 10.1007/s10798-017-9400-9.

[16] A. Sullivan, M. Bers & C. Mihm (2017). Imagining, playing, and coding with KIBO: using robotics to foster computational thinking in young children. Siu-cheung KONG The Education University of Hong Kong, Hong Kong, 110.

[17] Y. González & A. Muñoz-Repiso (2018, October). A robotics-based approach to foster programming skills and computational thinking: Pilot experience in the classroom of early childhood education. In Proceedings of the Sixth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (pp. 41-45). ACM.

[18] A. García-Valcárcel &Y. Caballero-González (2019). Robotics to develop computational thinking in early Childhood Education. [Robótica para desarrollar el pensamiento computacional en Educación Infantil]. Comunicar, 59, 63-72. https://doi.org/10.3916/C59-2019-06.

[19] M. García Valiente & M. Navarro Montaño (2017). Robótica para todos en Educación Infantil. 60, 81–104.

[20] E. Ruiz-Velasco-Sánchez (2007). Educatrónica: Innovación en el aprendizaje de las ciencias y la tecnología. México: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de https://cutt.ly/se6U8mL

[21] N.B., Lombana (2015). Uso de la robótica educativa como estrategia didáctica en el aula. Praxis & Saber, 6(11), 215-234. Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/4772/477247215010.pdf

[22] J.A. Gómez-Bustamante & A. L. Martínez-Cogollo (2018). Robótica educativa como propuesta de innovación pedagógica. Gestión, Competitividad e innovación (julio-diciembre 2018), 1-12.

[23] R. Hernández Sampieri, C. Fernández-Collado &P. Baptista-Lucio (2014). Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill Education.

[24] K. Brennan & M. Resnick (2012). New frameworks for studying and assessing the development of computational thinking. In Proceedings of the 2012 Annual Meeting of the American Educational Research Association (AERA) (pp. 1-25), Vancouver, Canada.

World Pendulum Alliance: student's first impressions in Brazil

Gesil S. Amarante-Segundo
Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas
Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)
Ilhéus, Brazil
gsamarante@uesc.br

Beatriz G. Amarante
Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas
Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)
Ilhéus, Brazil
bgamarante.bfi@uesc.br

Junio M. R. Cruz
Instituto de Física
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, Brazil
junio@unb.br

Alice M.Ribeiro
Instituto de Ciências Biológicas
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, Brazil
ribeiroalice@unb.br

Cassio H. S. Amador
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Cornélio Procópio, Brazil
cassioamador@utfpr.edu.br

Horário Fernandes
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
Lisboa, Portugal
hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

***Abstract*— The World Pendulum Alliance is a project that seeks to build a network of remote experiments for education and is working with pendulums arranged in different parts of the world to collect data on the acceleration of gravity at different latitudes and altitudes. The project initially involves institutions from Europe and Latin America and is partially funded by EACEA's Erasmus+ for Capacity building (higher education) program. One of the main contributions sought is to offer a scalable and flexible alternative to reduce the effect of the lack of access to practical experimentation in schools, not through simulations, but through the execution of real experiments, controlled at a distance. In this work we show data collected from first impressions collected among a small number of students from higher and basic education institutions in Brazil who accessed the pendulums in different institutions. The evaluations obtained are encouraging but point out some care that we must take to improve this project.**

Keywords*— *Pendulum, Remote Experiments for Education, STEM Teaching

I. INTRODUCTION

The simple pendulum is one of the most well-known models for oscillatory systems and has been a textbook case for introductory Physics, mathematical modelling and other disciplines, from high school to graduate college courses.

It consists of a point mass hanging by a fixed-length (L) cable, oscillating solely under the effect of the gravity. This oscillation is carried out over a single plane, there is negligible friction and air resistance, along with other physical simplifications. Together with the small-angles approximation, it is straightforward do arrive at an oscillatory solution with period T that depends only on L and on the local gravity acceleration g,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (1)$$

Such a situation is very easy to verify under not so strict precision requirements, which is very appropriate for educational purposes linked to a simple demonstration of a natural phenomenon. Given a textbook g value, a chronometer, and a simple wire with measured length holding an arbitrary mass one can verify that the model indeed works well.

Conversely, with a reasonably accurate measurement of L and averaging the period over many oscillations (assuming it should stay the same) one can infer the value of local g, which, as a surprise for many students, is not the same everywhere. The teacher can then talk about the causes for its variation, the main ones being the distance to the center of the planet and Earth's rotation. Both are dependent on the latitude, rendering a variable "effective g" which gives rise to interesting applications, including the preferable places to launch rockets (the closer to the Equator, the better).

In this context, the teacher's ability to perform simple classroom experiment is broken. He can't bring the students to many latitudes several degrees apart in order to show it

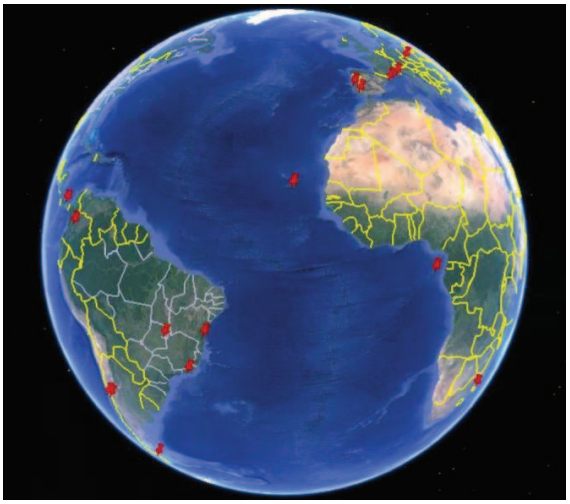


FIG. 1. WPA Pendulum locations across the globe.

1The WP@ELAB aka WORLD PENDULUM ALLIANCE is funded by the Erasmus+ program from the EU under the grant agreement 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00062

firsthand, besides it is a tenuous effect (less than 1%), not so easily observable in simple experiments.

II. The World Pendulum Project

The Instituto Superior Técnico (IST), part of Lisbon University, developed over the years a lab devoted to remote experiments for education, the e-lab [1,2,3,4]. It consists of a group of Physics experiments controlled through a Java-based interface, with adequate individual illumination and camera turned on when the experiment is accessed. The user not only controls some variables and accompanies the experiments execution while they are being performed but also can download the collected data over the internet, almost as if they have been performed in person.

This not only gives secondary and higher education institutions an important tool for sharing educational infrastructure, but it also provides opportunities for broader collaboration, particularly in science, technology, engineering and mathematics (STEM) education, and involves many aspects of information technology, such as remote handling, data acquisition and machine-human interface.

Following along with its gathered expertise, IST now leads a project funded by the EACEA's Erasmus+ for Capacity building [5] devoted to spreading the e-lab experience to other European institutions and, specially, Latin-American Universities. These collaborators, in turn, are expected to engage other local institutions, including high schools.

There are probably few experiments that would be more suitable to this international collaboration than the simple pendulum, precisely because it is indeed relatively simple, although it generates results that depend on the location, mainly on the latitude. This is, in short, the basis of the World Pendulum Alliance - WPA [6,7,8].

III. School Labs are Relatively Rare in Brazil

Projects such as the WPA are potentially important for Latin American countries as they have been consistently behind in global evaluations of educational systems for science and mathematics, as the OECD's PISA (Fig. 2).

Obviously, it remains to be well established the proper weight of the experimental activities (or its absence) in these evaluations. Nevertheless, despite important questions being raised since long ago [9], its importance is reasonably well established, such that it is considered an indicator of excellence on the evaluation of educational systems [10]. In comparison with simulated experiments, Sauter, Uttal, Rapp, Downing and Jona [11] have demonstrated that remote

FIG. 2. Pisa Average scores for reading, mathematics and science (means), 2018. World Bank Blogs [15]

experiments are superior in many senses, and this is supported by Ratamun and Osman [12].

According to the 2019 School Census organized by the Brazilian Education Ministry, only 40.9% of the State Public High Schools in Brazil had some kind of science laboratory (against 87% of the Federal ones, but these are fewer in number). Only 3.6% of the Municipal Public Schools of Elementary Education had a science laboratory [13].

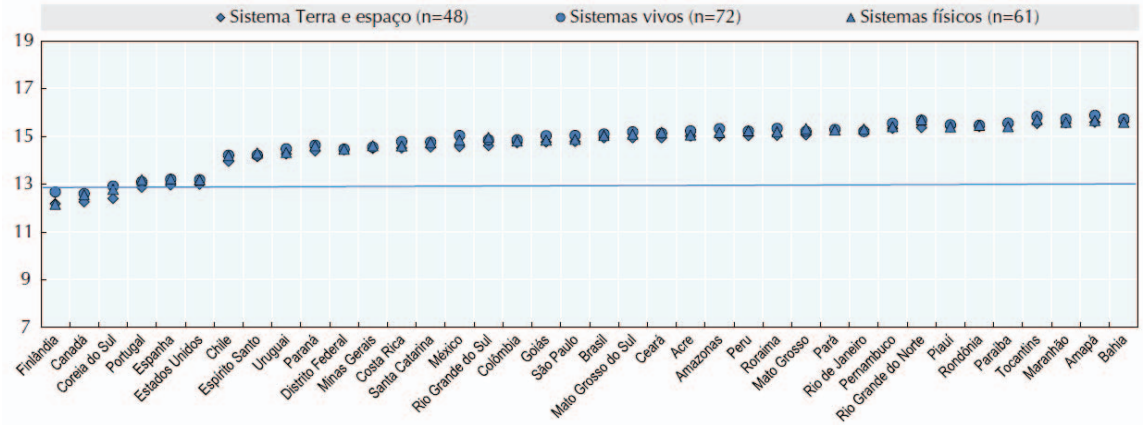
No surveys were found on the quality and frequency of use of these laboratories, but it is quite reasonable to assume that there are serious problems in this regard. Even in higher education institutions, despite the overall relative abundance and quality, it is quite common to find difficulties in keeping an infrastructure with quantity and quality of equipment for local use in regular courses.

This is a question that varies also internally among the states in the country, as can be seen in the 2015 PISA report for Brazil (Fig. 3) [13] and essentially didn't change much in the next following three years, as can be seen at the 2018 preliminary report [14] and Fig 2.

IV. Testing with the Students

As a reasonable number or pendulums is already installed by the three Brazilian institutions associated to the WPA, it was decided to ask the student's impressions with respect to the system, in order to improve on how they might be better presented to other students on the educational system. These tests do not aim at having a statistical relevance, given the 7.6 million high school students in Brazil [13], but first insights in some typical scenarios.

FIG. 3. Difficulty on science items according to systems by country and Brazilian federation unit (PISA Brazil report, OCDE and INEP, 2015).



The tests were made with 70 students, 26 from a public high school (in Bahia state, the lowest PISA's average score at Fig. 3) and 38 from a Federal University located at the Federal District, whose PISA's average are among the best in the country. A few other university students also answered the evaluation forms, from institutions at the states of Goiás and Maranhão.

Several questions were delivered to the students, covering the quality of internet access and the kind of equipment available. This is particularly important because of the interfaces used in the WPA. For the older (primary) pendulums, the interface is Java-based, the same as the e-lab (Fig. 5), while a new interface is being produced by this project, called Framework for Remote Experiments for Education (FREE), and the newest pendulums (secondary ones) are being accessed through it (Fig. 6).

A third option was an adaptation of the Relle [16] interface, in a collaboration with the Federal University of Santa Catarina (UFSC) in control of a secondary pendulum at the State University of Santa Cruz (UESC), in Ilhéus, Bahia (Fig. 7).

These last two interface options have the advantage of being able to be used on smartphones, as they don't imply the installation of Java, which requires the use of PCs, that are not available for a considerable number of students, specially at the secondary level (Fig. 9). Another important aspect is the availability of fast internet access, which is quite different among the two main populations of this survey (Fig. 8).

Having all those differences taken into account, some main results of the survey are worth considering:

55% were able to perform the entire experiment without problems. The main hurdle was some kind of difficulty to connect to the pendulum. Some couldn't collect the final data, and some could not see the video.

Nevertheless, 89% assign a high or very high (4 to 5 out of 5) relevance on remote experimentation for learning physics after having performed the experiment.

67% gave a 4 or 5 (up to 5) to the degree to which this experience changed their perception on the relevance of learning Physics, Science and Technology topics.

70% reported becoming eager to learn about pendulums, gravity measurement and related subjects, after performing the experiment.

Many other aspects of these student groups were collected and further analysis will guide a new and broader round of testing, to be performed at the end of the 2nd semester, including other states of the federation.

Although the overall results were in line with the expected differences between secondary and college students, such as higher availability of computers and better internet for the latter ones (Figures 8 and 9), the next rounds of tests must better separate those and other aspects, including regional differences.

The increase of the tests' coverage will stimulate a broader use of the pendulum network and strengthen the collaboration among its users. Such an increase will also allow better measurements of the students' response to the use of this kind of technological artifact for teaching in a large and inhomogeneous society and educational system.

FIG. 4. State and educational level of the 70 students involved on the survey.

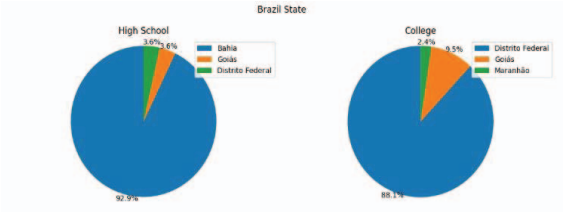


FIG. 5. Java e-lab Interface in control of a primary pendulum.

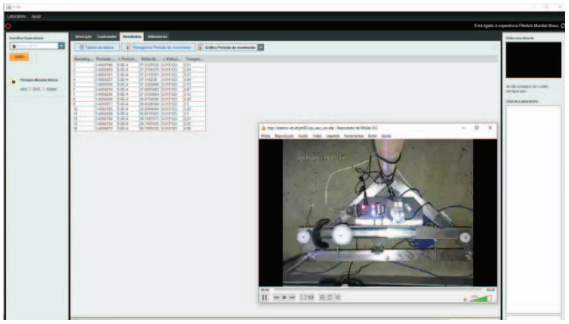


FIG. 6. FREE Interface in control of a secondary pendulum.

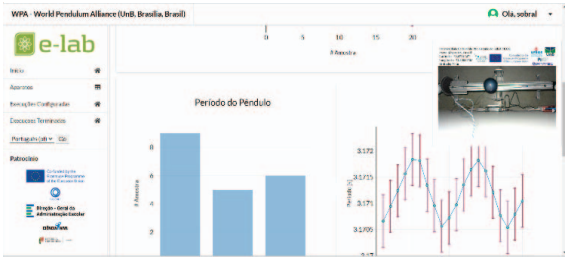


FIG. 7. RELLE Interface in control of a secondary pendulum.

FIG. 8. Difference in internet access between the high school and college students.

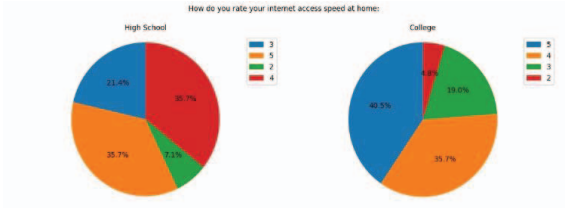
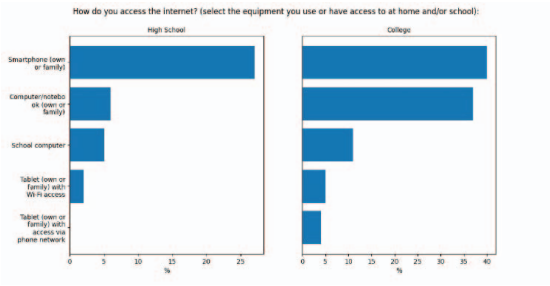


FIG. 9. Difference in equipment available for internet access between the high school and college students.



V. CONCLUSION

The World Pendulum has certainly a lot of room for improvement, if we want to have it as a demonstration of the possibilities of remote experiments in a broad scale as a dependable tool for educational systems.

It is somewhat clear that improvements on the stability of the system and further optimization of the interface, with full availability to smartphones, will have a big impact on the success of the project.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the EACEA for making the World Pendulum Alliance project possible through the Erasmus+ Programme, and also all the Brazilian universities and schools which agreed on joining the project.

REFERENCES

[1] R.B. Neto, H. Fernandes, J. Pereira, A.S. Duarte, "e-lab remote laboratory integrated overview", Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 9th Conference, 2012.

[2] R. B. Neto et al., "World wide remote distributed experiment on e-lab," 2013 2nd Experiment@ International Conference (exp.at'13), 2013, pp. 212-214, doi: 10.1109/ExpAt.2013.6703077.

[3] S. Balula, R. Henriques, J. Fortunato, T. Pereira, H. Borges, G. S. Amarante-Segundo, and H. Fernandes, "Distributed e-lab setup based on the raspberry pi: the hydrostatic experiment case study," in 3 rd Experiment@International Conference - exp.at'15, 2015.

[4] A. Torres, M. Santos, S. Balula, J. Fortunato and H. Fernandes, "Turning the internet of (my) things into a remote controlled laboratory," 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2016, pp. 371-374, doi: 10.1109/REV.2016.7444505.

[5] "Erasmus+ EU programme for education, training, youth and sport" https://erasmus-plus.ec.europa.eu/ accessed 28th July 2022.

[6] "The World Pendulum Alliance", https://wpa.tecnico.ulisboa.pt, accessed 14 July 2022.

[7] M. Santos et al., "World Pendulum Alliance", 2019 5th Experiment International Conference (exp.at'19), 2019, pp. 272-273, doi: 10.1109/EXPAT.2019.8876518.

[8] M. Escobar, H. Fernandes, O. Allard and Y. Erazo, "Pendulum as an Educational Remote Experiment," 2019 5th Experiment International Conference (exp.at'19), 2019, pp. 388-393, doi: 10.1109/EXPAT.2019.8876473.

[9] Hofstein A, Lunetta VN. "The Role of the Laboratory in Science Teaching: Neglected Aspects of Research". Review of Educational Research. Vol. 52(2), 1982, pp.201-217. doi:10.3102/00346543052002201.

[10] Sokolowska, Dagmara and Michelini, Marisa. "The Role of Laboratory Work in Improving Physics Teaching and Learning". 2018. doi:10.1007/978-3-319-96184-2.

[11] Megan Sauter, David H. Uttal, David N. Rapp, Michael Downing and Kemi Jona. "Getting real: the authenticity of remote labs and simulations for science learning", Distance Education, 34:1, 2013, pp. 37-47, doi: 10.1080/01587919.2013.770431

[12] Ratamun, M. M., and Osman, K. "The effectiveness of virtual lab compared to physical lab in the mastery of science process skills for chemistry experiment". Problems of Education in the 21st Century, 76(4), 2018, pp. 544

[13] BRASIL. "Censo da Educação Básica 2019: Resumo Técnico". Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep). Brasília, 2020.

[14] "Relatório Brasil no PISA 2015", https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4536892/mod_resource/content/1/TEXTO%2011_Brasil%20no%20Pisa%202015.pdf, accessed 28th July 2022.

[15] "Relatorio Brasil no PISA 2018-2 versão.indd – Inep",https://download.inep.gov.br/acoes_internacionais/pisa/documentos/2019/relatorio_PISA_2018_preliminar.pdf, accessed 28th July 2022.

[16] "What are the main lessons from the latest results from PISA 2018 for Latin America?", https://blogs.worldbank.org/latinamerica/what-are-the-main-results-pisa-2018-latin-america, accessed 28th July 2022.

[17] "RELLE - Ambiente de Aprendizagem com Experimentos Remotos", http://relle.ufsc.br/, accessed 28th July 2022.

Metrics for techno-social innovation management in higher education

Métricas para gestión de la innovación tecno-social en contextos de la educación superior

Sidia Moreno Rojas
Universidad Tecnológica de Panamá, CINEMI

Bolivar Bernal
Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Industrial

Juan Manuel Montes Hincapie,
0000-0002-2014-2431
Universidad de Medellín, Colombia

Zoila Yadira Guerra de Castillo
DOI: 0000-0003-2097-581X
Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Industrial

Abstract—

Social innovations respond to the emergence of Innovation Systems that support changes not driven exclusively by a techno-economic rationality. And although universities make efforts to complete the innovation cycle through their research, few manage to advance to the innovation phase. To deepen the study, regional research is developed on the technologies that universities in Ibero-America have been developing, the literature on TRL and the desirable characteristics were used in the design and execution of research projects in universities with respect to variables and criteria of social innovation including the concept of scientific diplomacy in a collaborative effort through nine higher educational institutions and eight countries.

Keywords— Tecno-social Innovation, metrics, higher education, science diplomacy, TRL

Resumen — Las innovaciones sociales responden al surgimiento de Sistemas de Innovación que apoyan cambios no impulsados exclusivamente por una racionalidad tecno-económica. Y aunque las universidades realizan esfuerzos por lograr completar el ciclo de innovación a través de sus investigaciones, pocas logran avanzar hasta llegar a la fase de innovación. Para profundizar en el estudio se desarrolla una investigación regional sobre las tecnologías que vienen desarrollando las universidades en Iberoamérica, se utilizó la literatura sobre TRL y las características deseables en el diseño y ejecución de proyectos de investigación en universidades con respecto a variables y criterios de innovación social incluyendo el concepto de diplomacia científica en un esfuerzo de colaboración a través de nueve instituciones de educación superior y ocho países.

Palabras claves — innovación tecno-social, métricas, educación superior, diplomacia científica, TRL

I. INTRODUCCION

Las innovaciones sociales responden al surgimiento de Sistemas de Innovación que apoyan cambios no impulsados exclusivamente por una racionalidad tecno-económica. Con referencia al contexto de este especial enfoque, se puede acotar que muchas universidades poseen poca comprensión de cómo avanzar en ciclos de generación, maduración y aplicación de tecnologías sociales que propugnen por un mayor desarrollo comunitario o regional fundamentado en la equidad, sostenibilidad y transformación social.

Para profundizar en el estudio se desarrolla una investigación regional sobre las tecnologías que vienen desarrollando las universidades en Iberoamérica, para lo cual se utilizó la clasificación de la NASA sobre *Technology Readiness Level* (niveles de madurez de la tecnología), TRL [1] y las características deseables en los procesos de diseño y ejecución de proyectos de investigación en universidades con respecto a variables y criterios de innovación social [2] [3].

Según el Instituto de Innovación Social en Barcelona, un proyecto de innovación social debe impactar por lo menos a mediano plazo de manera positiva las siguientes cuatro variables: transformación social; sostenibilidad económica y viabilidad; gestión de innovación y la cuarta escalabilidad y replicabilidad [4].

Basándose en datos empíricos recopilados a partir de una muestra de proyectos de investigación científica y tecnológica en nueve universidades de diferentes países de la región iberoamericana, se identifica que alrededor de dos terceras partes de los proyectos responden a una necesidad social, no obstante, la mayor parte registra avances por

erior ©2022 IEEE

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00063

debajo de la media, por lo que se podría presumir una deficiencia en el proceso durante el ciclo de maduración, impidiendo que estos proyectos trasciendan a un aporte efectivo para el cambio de una realidad social que se quiere mejorar. Por lo cual se estudian las posibles contribuciones de proyectos de investigación de las universidades a la innovación social en la región.

A. Innovación Tecno-social

La innovación tecno-social se considera cada vez más un componente fundamental para la eficacia y sostenibilidad de proyectos de investigación aplicada y la generación de nuevas tecnologías que pueden ser utilizadas para atender desafíos sociales en todo el mundo. Mejorar las problemáticas actuales exige aprovechar los saberes de la sociedad en conjunto con los conocimientos avanzados desde la academia para fomentar innovación inclusiva y frugal. Para que esto ocurra, las universidades, al igual que los demás actores del ecosistema deben tener su rol claramente definido [5].

Con referencia a la métrica de innovación en proyecto tecno-sociales, diferentes iniciativas han considerado el TRL como herramienta para identificar y medir la maduración tecnologías generadas por proyectos empresariales con potencial de impacto social, haciendo evaluaciones a partir de la lista de verificación de los criterios de innovación social presentes en cada nivel de maduración del proyecto. Por ejemplo, la SENACYT, en Guatemala ha diseñado un modelo de check-list a aplicar en cada evaluación de TRL de productos desarrollados por startups de impacto social, que puede ser replicado en todos los países de la región latinoamericana [6] [7].

B. Gestión de la Innovación

La gestión de la innovación de proyectos de investigación de impacto social en las universidades, para que sea sostenible, requiere mantener el foco en procesos de codiseño y en métricas que evalúen el proceso, desde la generación de la idea hasta la implementación de la solución, buscando resultados a la luz de las dinámicas sociales y procesos de transformación social. En el proceso se involucran conocimientos avanzados y generación y adaptación de tecnologías sociales que puedan ser aprovechadas por poblaciones vulnerables mediante un proceso efectivo de apropiación social de la ciencia y la tecnología [8] [9]. Dentro de este contexto, se valora la colaboración y el trabajo en redes de cooperación para gestionar y compartir de manera estratégica los recursos y capacidades de innovación [10], que se tienen desde las universidades y contribuir a la solución de problemas, satisfacción de necesidades o aprovechamiento de oportunidades que finalmente han de impactar en el desarrollo de la región.

C. TRL

Los niveles de madurez de la tecnología [1], según su traducción al español, constituyen valoraciones de desarrollo que se extienden desde los principios básicos de una nueva idea de tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real. La metodología de TRL, se ha aplicado en diferentes industrias durante más de 40 años, lo que ha ayudado al desarrollador tecnológico, a gestionar los riesgos, comunicar el progreso del desarrollo y especificar los entregables. A continuación, las definiciones de los niveles de TRL:

Nivel 9 Lanzamiento del sistema probado a través de operaciones de misión exitosas

Nivel 8 Sistema real completo y considerado para lanzamiento a través de pruebas y demostraciones

Nivel 7 Demostración del prototipo del sistema en un entorno operativo

Nivel 6 Demostración de modelo o prototipo de sistema/subsistema en entornos relevantes.

Nivel 5 Validación de componentes y/o placas de pruebas en el entorno relevante

Nivel 4 Validación de componentes y/o placas de pruebas en entornos de laboratorio

Nivel 3 Función crítica analítica y experimental y/o característica o prueba de concepto

Nivel 2 Concepto y/o aplicación de la tecnología formulada

Nivel 1 Principios básicos observados y notificados

D. Diplomacia Científica

El compromiso universidad-comunidad está emergiendo como un canal importante para la innovación social, lo que requiere que las universidades actúen como agentes de cambio en sus entornos locales. Este rol presenta nuevos desafíos para universidades, ya que requiere ir más allá de las fronteras institucionales para colaborar con socios no tradicionales como empresas informales, y para estimular y apoyar la innovación que pueda considerarse relevante para un entorno local dado. En este sentido la diplomacia científica, como enfoque emergente útil en la búsqueda de soluciones para alcanzar intereses comunes con la voluntad de los gobiernos otros actores, cobra vital relevancia en la presente investigación. Esto en virtud de que el análisis a partir de la comparación de los niveles de TRL obtenidos, permitirán inferir sobre las falencias que se deben abordar para avanzar en los procesos de maduración de las tecnologías presentadas a partir de los proyectos evaluados con el instrumento mencionado.

En este esquema de asesoramiento analítico, luego de contar con información sobre una problemática, los científicos se reúnen con los diplomáticos a fin de trabajar en conjunto para generar políticas públicas nacionales o regionales y cambiar el discurso de los tomadores de decisiones, que usualmente se elaboran desde el protocolo político y no científico [11].

Bajo esta consideración, es urgente aprovechar la Diplomacia Científica como estrategia para la construcción de políticas públicas conectadas con las capacidades de innovación que tienen las universidades y a su vez convertirse en el espacio que permita a los investigadores conocer los problemas, necesidades u oportunidades reales del territorio para orientar mejor el desarrollo y aprovechamiento de sus recursos y capacidades [12] [13].

II. METODOLOGÍA

A. *Preguntas de investigación*

Con una noción de Desarrollo Humano Sostenible (DHS) entendida desde los principales desafíos que entrañan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y enfocados en el por qué de la poca sostenibilidad de los resultados de proyectos de impacto social y las posibles soluciones, surgen ~~una~~ algunas preguntas desde la academia:

- Preguntas 1: ¿Como medir el nivel de alistamiento de la tecnología que se viene desarrollando desde las universidades en Iberoamérica?
- Pregunta 2: ¿Cuál puede ser una estrategia integradora para la gestión de la innovación desde las universidades en Iberoamérica como una forma de contribuir al desarrollo económico y social?

B. *Método de Recolección de datos*

A partir del trabajo de investigación realizado por la Red de Investigación y Desarrollo "Construcción y Evaluación de Capacidades de Innovación del Sector Académico" (CECIAC), financiada por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) se realizó la recolección de la data. Se trata de un proyecto iniciado en el año 2019, liderado por la UTP, mediante el binomio virtuoso -Facultad y Centro de Investigación-, marcando un importante hito de gestión integral institucional, con el compromiso de fomentar la creatividad, la innovación y la competitividad en conjunto con el sector empresarial, gubernamental y la sociedad civil de la comunidad iberoamericana.

Su propósito central es impulsar el desarrollo de capacidades para fortalecer la gestión de innovación con orientación prosocial en Universidades de la región, a fin de propiciar una economía de alta productividad para un desarrollo social y sostenible. Fue así como se consideraron 8 universidades de la región latinoamericana y una de España, todas socias de la red. En base a su gestión investigativa, se le aplicó un instrumento de identificación del nivel de madurez de generación de tecnologías a una muestra de 267 proyectos, cuya distribución por institución que participó se presenta en la

TABLA *I*.

TABLA I. DISTRIBUCIÓN DE PROYECTOS SEGÚN INSTITUCIÓN

Institución	Cantidad de Proyectos
Universidad 1	48
Universidad 2	43
Universidad 3	42
Universidad 4	32
Universidad 5	31
Universidad 6	28
Universidad 7	18
Universidad 8	14
Universidad 9	11

La encuesta contenía una serie de preguntas enfocadas en evaluar los niveles de madurez de tecnología de los proyectos de investigación que se estaban realizando en cada institución participante e identificar los principales beneficiarios de dichos proyectos.

El instrumento de investigación, para la recolección de los datos, estaba dividido en cuatro secciones, en la primera sección se hacían consultas generales del investigador (institución a la que pertenece, cargo que ocupa y tiempo de laborar en la institución), la segunda sección se detallaba el nombre del proyecto y los beneficiarios del mismo, la tercera sección se solicitaba indicar el nivel de madurez tecnológica en la que se encontraba dicho proyecto, la última sección constaba de una lista de verificación de las actividades correspondientes al nivel de madurez previamente indicado. El diseño del cuestionario fue validado por un panel de expertos sobre el tema.

El periodo de recolección de los datos fue de septiembre de 2021 a junio 2022. La mayor dificultad a la hora de colocar las encuestas fue la baja tasa de respuesta, de aproximadamente un 20%. Es decir que 1 de cada 5 solicitudes eran atendidas.

C. *Procesamiento de los datos*

Los datos fueron depurados y procesados con el paquete estadístico MS Excel y SPSS. Se realizaron estadísticos descriptivos de la información obtenida, tanto de forma global, como de forma individual para cada institución participante.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. *Análisis Globales*

A continuación, se presentará un análisis global de los principales hallazgos relacionados con el TRL. El 58% de los proyectos se encuentran en las tres primeras etapas, consideradas como la Prueba de Concepto, es donde se realizan las pruebas de concepto y laboratorio; el otro 25% están en las etapas 4 al 6, donde se llevan a cabo simulaciones del producto, es aquí donde se realizan los primeros prototipos y es la etapa donde muchos de los proyectos no continúa, algunos le llaman "el valle de la muerte"; el restante 17% está en las tres últimas etapas del TRL, donde el producto es llevado a un entorno real con miras a obtener su certificación (ver *TABLA II*).

TABLA II. DISTRIBUCIÓN DE PROYECTOS SEGÚN NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA

Nivel de Madurez Tecnológica	Cantidad de Proyectos
TRL1	77
TRL2	24
TRL3	54
TRL4	33
TRL5	14
TRL6	19
TRL7	31
TRL8	2
TRL9	13

Por la naturaleza de los participantes de la investigación, se puede apreciar en la TABLA III, que el mayor beneficiario de los proyectos es la Comunidad, en donde el 63.9% de los proyectos presentados tienen un impacto directo en ésta.

TABLA III. BENEFICIARIOS DE LOS PROYECTOS

Beneficiarios del Proyecto	Cantidad	%
Gobierno	107	40.7%
Sector Privado	108	41.1%
Comunidad	168	63.9%
Otros	62	23.6%

Es necesario aclarar que algunos proyectos podían incidir en más de un beneficiario y por lo tanto los porcentajes de cada sector son contrastados contra el total de proyectos evaluados. Las variedades de proyectos mostrados incidían también en otros sectores como: agropecuario, cafetalero, porcino, forestal, salud, apoyo a personas con discapacidad, entre otros.

Un punto importante a destacar es el tiempo de vinculación que tienen los investigadores encuestados con las instituciones a las cuales pertenecen. El promedio de años de vinculación con las instituciones es de 13.6 años, el cual resulta de la combinación de investigadores con pocos años e investigadores con muchos años, lo cual es positivo para generar pertenencia. La *TABLA IV* muestra el promedio de años según institución siendo la que marcó el mayor promedio la Universidad Politécnica de Cataluña.

TABLA IV. DISTRIBUCIÓN DE PROYECTOS SEGÚN INSTITUCIÓN

Institución	Vinculación
Universidad 5	23.1
Universidad 9	17.5
Universidad 8	17.0
Universidad 1	15.2
Universidad 3	12.1
Universidad 6	11.7
Universidad 4	9.8
Universidad 7	7.4
Universidad 2	7.1

B. Análisis Comparativo

En esta sección se harán comparaciones entre las distintas instituciones a fin de establecer similitudes y diferencias entre los distintos participantes del proyecto.

En la

TABLA V, se aprecia que la mayor parte de los proyectos de investigación están en las primeras tres etapas de Nivel de Madurez Tecnológica, estando en estos tres niveles más del 50% de los proyectos, independientemente de la institución. Aproximadamente, una media de 15% de las investigaciones están en las etapas de comercialización.

TABLA V. NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA SEGÚN INSTITUCIÓN

Institución	TRL 1 a 3	TRL 4 a 6	TRL 7 a 9
Universidad 1	70.2%	21.3%	8.5%
Universidad 2	86.0%	11.6%	2.3%
Universidad 3	45.2%	28.6%	26.2%
Universidad 4	71.9%	21.9%	6.3%
Universidad 5	45.2%	35.5%	19.4%
Universidad 6	50.0%	32.1%	17.9%
Universidad 7	0.0%	27.8%	72.2%
Universidad 8	64.3%	35.7%	0.0%
Universidad 9	45.5%	18.2%	36.4%

Independientemente de la institución, se evidencia que el sector que recibe el mayor beneficio, en materia de proyectos de investigación, es la Comunidad. Tal como se aprecia en la

TABLA VI, sobre este sector incide aproximadamente un 70% de los proyectos.

TABLA VI. BENEFICIARIOS DE LOS PROYECTOS SEGÚN INSTITUCIÓN

Institución	Gobierno	Sector Privado	Comunidad
Universidad 1	58.7%	30.4%	69.6%
Universidad 2	44.2%	65.1%	74.4%
Universidad 3	50.0%	54.8%	66.7%
Universidad 4	23.3%	16.7%	60.0%
Universidad 5	30.0%	33.3%	36.7%
Universidad 6	53.6%	21.4%	67.9%
Universidad 7	38.9%	50.0%	77.8%
Universidad 8	7.1%	28.6%	71.4%
Universidad 9	9.1%	81.8%	27.3%

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque en un gran número de universidades de Iberoamérica se cuenta con recursos y capacidades desde la I+D+i que podrían aprovecharse de manera estratégica para contribuir al desarrollo económico y social, todavía no se ha probado lo suficiente la opción de orientar la innovación y la investigación para dar soluciones adaptadas al contexto, lo que aunque no contribuya a generar tecnologías de vanguardia ni a formar parte de las grandes cadenas de valor podrá aportar soluciones a problemas locales.

Conviene profundizar en la metodología TRL, como métrica referencial para el diseño de una estrategia de gestión de la innovación tecno-social desde las universidades en Iberoamérica con miras a identificar los recursos y capacidades que pueden contribuir al desarrollo de la región.

La Diplomacia Científica y la adaptación de los TRL de acuerdo a criterios de innovación social se puede utilizar para la generación de una estrategia integradora que propicie proyectos que desarrollen capacidades claves en los sistemas

locales, regionales y nacionales de innovación y de valor compartido entre los responsables de contribuir al desarrollo económico, social y tecnológico de los territorios.

Se recomienda la construcción activa de estrategias para la cooperación y el trabajo en redes que permitan contribuir a la solución de problemas sociales, la satisfacción de necesidades básicas de los territorios o el aprovechamiento de oportunidades para la generación o adaptación de tecnologías emergentes para los países de la región como un mecanismo que aporte al crecimiento y desarrollo en Latinoamérica.

Como trabajo futuro, se espera ampliar la investigación a fin de determinar potencial de impacto social de los proyectos en las universidades y las principales dificultades que ha confrontado el investigador para el desarrollo de los mismos. De igual forma se considerará evaluar si existe una cultura que fomente la innovación tecno-social en las instituciones participantes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al programa CYTED por la financiación de la red CECIAC. A cada una de las universidades participantes por proveer la información solicitada. A los investigadores que amablemente respondieron la encuesta.

REFERENCIAS

[1] NASA. “NASA 7123.1B Systems Engineering Processes and Requirements.” . 2015. “Why We Explore.”

[2] Hernández, J.; Tirado, P.; Ariza, A.: El concepto de innovación social: ámbitos, definiciones y alcances teóricos CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa, núm. 88, diciembre, 2016, pp. 164-199

[3] Carrizo, E.; Moreno, S.; Modelo Hibrido: Gestión del Cambio e Innovación Social. Anais do X Congresso Internacional de Conhecimento e Inovação (ciKi) [Internet]. 2020 Nov 18 [cited 2022 Sep 16]; Available from: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsair&AN=edsair.doi.fce415c851e940289b17aaaee2dd71c8&lang=es&site=eds-live&scope=site

[4] Instituto de Innovación Social. Antena de Innovación Social. Vías hacia el cambio sistémico. Heloise Buckland · David Murillo (2013). Barcelona, España

[5] Sáez, F. :Cultura y Tecnología en el Nuevo Entorno Tecnosocial. (F. R. S. para el D. de las Telecomunicaciones, Ed.)Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53). Madrid: Fundación Vodafone 2013 http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

[6] Héder, M.: From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal, 2017, Volume 22(2). Retrieved from https://www.innovation.cc/discussionpapers/2017_22_2_3_heder_nasa-to-eu-trl-scale.pdf

[7] Boburg, P; Mazariegos, C.:Science-Policy Brief for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs, May 2022 Utilizing the Technology Readiness Level scale (TRL) for measuring social impact startups. Guatemala.

[8] Mergel, I.: Open Collaboration in the Public Sector: The Case of Social Coding on Github. Government Information Quarterly, 32(4), 464-472. http://doi.org/10.1016/j.giq.2015.09.004

[9] Marín, A., & Rivera, I.: Revisión teórica y propuesta de estudio sobre el emprendimiento social y la innovación tecnológica. *Acta Universitaria*, *24*, 48–58. 2015 https://doi.org/10.15174/au.2014.708

[10] Moreno, S.; Carrillo, A.; Sistema para la evaluación de capacidades de innovación en PYMES de países en desarrollo: caso Panamá. Revista Facultad de Ciencias Economicas: Investigacion y Reflexion. 2014; 22(2):109–22. Available from: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edo&AN=100596861&lang=es&site=eds-live&scope=site

[11] Melchor, L., Lacunza I, & Elorza A., (2020). What Is Science Diplomacy? In: S4D4C European Science Diplomacy Online Course, Module 2, Vienna: S4D4C.

[12] Echeverría, L., Aquino, K. & Widmaier, C. (2020). Science Diplomacy and Sustainable Development Goals: A Latin American Perspective. Science Diplomacy Review, 2(1), 3-13.

[13] H. Buckland, D. Murillo. Instituto de Innovación Social de ESADE. Fondo Multilateral de Inversiones-Banco Interamericano de Desarrollo (FOMIN). La Innovación Social en América Latina- Marco conceptual y agentes. Septiembre, 2014. ONLINE: http://proxymy.esade.edu/gd/facultybio/publicos/1431613105032_ESADE-FOMIN-La-innovacion-social-en-America-Latina-Marco-conceptiual-y-agentes Consulta: 07/05/2020

IEEE conference

Ipeti river's water quality based on the aquatic macroinvertebrates community

Calidad del agua del río Ipetí con base en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos

Kleveer Espino
Centro de investigaciones Hidraulicas e Hidrotecnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
kleveer.espino@utp.ac.pa

Ulises Jiménez
Centro de investigaciones Hidraulicas e Hidrotecnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ulises.jimenez@utp.ac.pa

Euclides Deago
Centro de investigaciones Hidraulicas e Hidrotecnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
euclides.deago@utp.ac.pa

***Abstract* — This research is aimed to determine the composition and abundance of macroinvertebrates at the taxonomic order and family level, and the water quality in the Ipeti River with the use of the Modified Biological Monitoring Working Party Index for Panama. The site is located 115 km east of Panama City. Sampling was conducted upstream and downstream of a river section near the Ipeti-Embera indigenous community, between June thru September 2017. A total of 2 508 aquatic macroinvertebrate individuals were registered, belonging to 8 orders and 28 families. The orders with the highest number of registered individuals are: *Ephemeropetera* with 1 812, *Coleoptera* with 276, *Hemiptera* with 176 and *Diptera* with 127. It is reported that the water quality of the Ipeti River section studied ranges between contaminated and regular water categories.**

Keywords — biological indicators, BMWP, freshwater systems, Panama

***Resumen* — Esta investigación tuvo como objetivo determinar la composición y la abundancia de macroinvertebrados a nivel de orden y familia taxonómica, y la calidad del agua en el río Ipetí con el uso del Índice del Grupo de Trabajo de Monitoreo Biológico modificado para Panamá. El sitio se ubica a 115 Km al este de la ciudad de Panamá. Se realizaron campañas de muestreo aguas abajo y aguas arriba de una sección del río cercana a la comunidad indígena de Ipetí-Emberá, entre junio y septiembre de 2017. Se registraron 2 508 individuos de macroinvertebrados acuáticos, pertenecientes a 8 órdenes y 28 familias. Los órdenes con mayor número de individuos registrados son: *Ephemeropetera* con 1 812, *Coleoptera* con 276, *Hemiptera* con 176 y *Diptera* con 127. Se reporta que la calidad del agua de la sección del río Ipetí estudiada oscila entre las categorías de aguas contaminadas y regular.**

Palabras claves — BMWP, indicadores biológicos, Panamá, sistemas dulceacuícolas

I. INTRODUCCIÓN

La composición de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos dulceacuícolas y el estado de calidad del agua en estos ecosistemas son el resultado de la interacción entre los organismos que allí viven con la calidad fisicoquímica del agua, la atmósfera y el medio terrestre que le rodea [1]. Los ecosistemas de aguas dulce revisten de gran importancia principalmente como fuente del vital líquido; a pesar de ello, han sido grandemente impactados por las actividades del hombre, afectando claramente la biota acuática y la calidad del recurso hídrico [2].

Las comunidades de macroinvertebrados dulceacuícolas pueden emplearse de manera eficiente como indicadores biológicos de la calidad de agua [3]. Recientemente, se han desarrollado índices bióticos que se basan en la presencia (o la ausencia), la abundancia y los *taxa* de macroinvertebrados dulceacuícolas para la determinación de la calidad de los ecosistemas acuáticos [4]. Entre los índices más comunes para determinar la calidad del agua están los métodos para medir la biodiversidad y los de medida de tolerancia o sensibilidad, como el de puntuación del Grupo de Trabajo de Monitoreo Biológico (BMWP, por sus siglas en inglés).

El BMWP asigna puntajes a los *taxa* (familias) en función de su tolerancia a la contaminación. Los taxones que son característicos de las condiciones menos contaminadas obtienen una puntuación más alta que los que dominan las corrientes contaminadas [5]. Un BMWP más alto generalmente indica una mejor salud del río.

Los monitoreos con base en análisis fisicoquímicos y microbiológicos nos brindan información sobre las condiciones de la calidad del agua en el momento en que se toma la muestra; en cambio, el monitoreo biológico de macroinvertebrados tiene la ventaja de brindarnos información tanto de condiciones pasadas, como de las actuales [6]. El concepto de calidad de las aguas ha ido cambiando rápidamente de un enfoque puramente fisicoquímico a otro que integra todos los componentes del ecosistema [7].

Las variaciones fisicoquímicas basadas en un monitoreo tradicional sólo dan una idea puntual e instantánea, para un momento dado de condiciones abióticas del ecosistema acuático [8]. Lo realmente importante para evaluar la calidad de un ecosistema es conocer qué tipo de organismos y en cuánta cantidad sostiene la vida. En ese sentido, estudiar y monitorear la comunidad de macroinvertebrados dulceacuícolas ofrece más información sobre las variaciones de la calidad del agua en el tiempo [6], [9].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00064

Los macroinvertebrados acuáticos son organismos que habitan en los sedimentos o en cualquier tipo de substrato (hojarasca, tronco, macrófitas, etc.). Se incluyen los individuos iguales o mayores a 250 µm, entre ellos se encuentran diferentes grupos taxonómicos como los turbelarios, los nemátodos, los oligoquetos, los hirudíneos, los insectos, los arácnidos, los crustáceos, los gasterópodos y los bivalvos [10].

Los macroinvertebrados, en especial los insectos, son utilizados para evaluar los cambios ambientales de la calidad del agua. La vigilancia y el seguimiento de las características biológicas de las comunidades como: la abundancia y la composición taxonómica de cada cuerpo de agua, permiten detectar alteraciones al ecosistema de manera precisa y rápida [11].

Los cambios ambientales de calidad del agua son generados principalmente por los aportes de contaminantes urbanos, los cuales tienen diferentes fuentes que pueden ser difusas o puntuales. Los desagües cloacales y los efluentes industriales contribuyen con una alta carga de contaminantes (desechos orgánicos e inorgánicos) a la degradación de la calidad del agua de los ambientes dulceacuícolas [12].

El uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas como indicadores biológicos para evaluar la calidad de las aguas ya ha sido incorporado en planes de monitoreo ambiental en algunos países de la región Latinoamericana [10], [13]. Países como: Colombia, México, Chile, El Salvador y Costa Rica desarrollaron un índice integrado para determinar el estado de salud ecológica del agua para la región Mesoamericana con base en la composición de taxones presentes y la abundancia de organismos de la comunidad de macroinvertebrados, y lo utilizan para evaluar la calidad de los ríos [10], [13]. El manejo efectivo de los recursos hídricos (o la calidad ambiental) requiere conocer los cambios que ocurren en el medio ambiente y comprender las causas subyacentes de cualquier cambio que pueda predecirse u observarse.Por lo tanto, en nuestra investigación usamos como referencia el río Ipetí, localizado en el este de la provincia de Panamá. Si bien es cierto que no contamos con una estandarización de la calidad del agua empleando macroinvertebrados, se cuenta con el índice de calidad del agua (ICA), como herramienta para establecer la salud del cuerpo de agua. Los objetivos definidos en la investigación fueron: primero, determinar la composición y la abundancia de macroinvertebrados acuáticos dulceacuícolas a nivel de orden y familia taxonómica en una sección del río Ipetí; y segundo, comparar la calidad del agua de una sección del río Ipetí utilizando los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (ICA) y el índice del Grupo de Trabajo de Monitoreo Biológico modificado para Panamá (BMWP-PAN).

II. METODOLOGÍA

A. *Sitio de estudio*

El estudio se llevó a cabo en una sección del río Ipetí, cercana a la comunidad indígena de Ipetí-Emberá, en el distrito de Chepo; la cual se encuentra a 115 Km al este de la ciudad de Panamá (Figura 1).

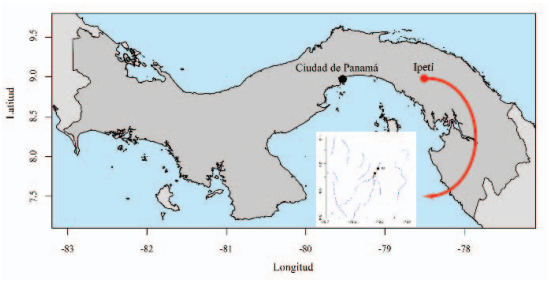


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.

La comunidad Ipetí-Emberá se ubica en la cuenca del río Bayano. Esta es la cuenca hidrográfica No. 148 y está formada por los ríos Ipetí y Bayano (o Madugandí), siendo este último el río principal. La cuenca se encuentra en la vertiente del Pacífico, al este de la provincia de Panamá, entre las coordenadas 8°49' N y 9°23' N y 78°04' O y 74°17' O. La cuenca del río Bayano ha sido identificada como una de las diez cuencas prioritarias del país [14].

El área de drenaje total de la cuenca es de 4 984 Km^2 hasta la desembocadura al mar y la longitud del río principal, el Bayano, es de 215 Km y tiene un caudal mensual promedio de 162 m^3s^{-1}. Esta cuenca presenta un índice de disponibilidad hídrica relativa anual de 88, que indica que hay una abundante oferta de agua, incluso en los meses de temporada seca [14].

La elevación media de la cuenca es de 150 msnm, y el punto más alto se encuentra en la cadena de montañas ubicada en la parte sur, Serranía de Majé y Cañazas, en el Cerro Chucantí, con una elevación máxima de 1 200 msnm. La cuenca registra una precipitación media anual de 2 788 mm, y la distribución espacial de las lluvias es bastante heterogénea. La precipitación oscila entre 2 000 y 5 000 mm al año, con un 86 % de la misma ocurriendo entre los meses de mayo a noviembre [14].

B. *Procedimiento de muestreo*

Se establecieron los puntos de muestreo de manera preferencial: el primero, se ubicó aguas arriba de la comunidad Ipetí-Emberá en los 8°57'50'' N y 78°31'17'' O, y el segundo, aguas abajo en los 8°58'52'' N y 78°30'20'' O. Ambos sitios de muestreo se ubican próximos a las poblaciones, en zonas de bosques intervenidos, donde el suelo es utilizado para el cultivo y actividades de ganadería vacuna y porcina. Se realizaron tres muestreos (un muestreo por mes). Se muestrearon en rápidos y pozas, en substratos minerales (cantos), vegetación ribereña y hojarasca. En cada punto de muestreo se midieron los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos (temperatura, pH, nitrato, fosfato, DBO_5, turbiedad y coliformes fecales).

Se recolectó material para la búsqueda de macroinvertebrados dulceacuícolas aplicando el método *kicking*, que consiste en usar una red tipo D de 250 µm de luz, la cual se apoya en el substrato. Luego, con los pies se remueve el fondo, moviéndose espalda contra la corriente, una distancia de dos metros, por cerca de dos minutos. También, se revisó la hojarasca, la vegetación acuática y las piedras, las cuales se lavan sobre tamices para recoger el material. Se revisaron todos los tipos de substratos presentes, porque de esto depende la precisión de la evaluación de la calidad del agua usando índices biológicos.

Los organismos recolectados se colocaron en recipientes de vidrio y preservaron en alcohol al 70 %. Cada recipiente fue debidamente rotulado con la fecha, el sitio, el nombre de los recolectores y el tipo de muestreo. Las muestras se llevaron al Laboratorio de Sistemas Ambientales de la Universidad Tecnológica de Panamá.

C. *Identificación de macroinvertebrados*

Se limpiaron las muestras colocándola, parte por parte, en una placa de Petri. Luego, con la ayuda de un estéreo microscopio *Accu Scope* (de 10x a 60x) y agujas de disección, se extrajeron los individuos.

Se identificaron los organismos usando claves taxonómicas de órdenes y familias de macroinvertebrados dulceacuícolas [15]-[19]. Se agruparon los organismos por taxón, primero por orden, y luego por familia. Por último, se contaron todos los individuos dentro de una familia para cada una de las muestras. Se creó la base de datos de las abundancias definida por las variables familia, orden, fecha, punto de muestreo y abundancia.

D. *Estimación de la calidad de agua*

Se calculó el índice BMWP modificado para Panamá. El índice permite calcular la calidad biológica del agua en una escala que va de 0 a más de 150 y divide la calidad de agua en seis categorías, grados o escalas de contaminación, que son: excelente, buena, regular, contaminadas, muy contaminadas y extremadamente contaminadas. El índice BMWP se fundamenta en la presencia de familias sensibles o tolerantes a la contaminación del agua; para calcularlo se suman los puntos asignados a cada familia según su tolerancia; las puntuaciones altas significan alta sensibilidad a perturbaciones en la calidad del agua, y bajas, lo contrario.

El análisis de la datos para calcular índices bióticos de agua dulce se realizó usando funciones del paquete *biotic* [20] en el programa R [21]. Se creó una nueva tabla de índice con los 77 *taxa* y sus valores de tolerancia del BMWP modificado para Panamá actualizado presentado en el diagnóstico de la condición ambiental de los afluentes superficiales de Panamá [22]. También, se calculó el ICA con base en siete parámetros, metodología en Brown et al. [23].

III. Resultados

A. *Composición y abundancia*

El resumen de los datos de composición y abundancias de macroinvertebrados por familia para una sección del río Ipetí se muestran en la Tabla I.

TABLA I. Composición y abundancias de macroinvertebrados para una sección del río Ipetí

Familia	*P1. jun*	*P1. jul*	*P1. sep*	*P2. jun*	*P2. jul*	*P2. sep*
Baetidae	12	11	29	7	13	6
Belostomatidae	0	0	0	0	0	1
Calamoceratidae	0	0	0	0	1	0
Calopterygidae	0	0	0	0	2	8
Chironomidae	15	22	22	15	11	26
Coenagrionidae	1	1	0	0	0	3
Corydalidae	6	11	8	5	0	1
Culicidae	0	1	0	0	2	0
Elmidae	12	68	23	25	7	24
Euthyplociidae	0	0	1	0	0	0
Gelastocoridae	1	0	0	0	1	0
Gerridae	10	15	10	8	35	35
Gomphidae	0	0	0	1	2	0
Hydropsychidae	2	12	5	1	0	0
Leptoceridae	0	1	1	0	0	0
Leptohyphidae	76	179	93	239	99	122
Leptophlebiidae	123	226	124	269	110	73
Libellulidae	0	0	0	0	0	1
Mesoveliidae	0	0	0	0	0	2
Naucoridae	8	16	10	4	5	5
Perlidae	2	12	11	3	2	4
Philopotamidae	3	1	0	0	0	0
Protoneuridae	0	0	0	0	6	0
Psephenidae	13	51	12	31	1	2
Ptilodactylidae	0	0	5	0	0	2
Simuliidae	2	4	0	4	1	0
Tipulidae	0	0	1	0	0	1
Veliidae	0	0	0	0	0	10

P1 es el sitio de estudio aguas arriba y P2, aguas abajo. Los códigos jun, jul y sep corresponden las fechas de muestreo, 16 de junio de 2017, 20 de julio de 2017 y 26 de septiembre de 2017, respectivamente.

Se recolectaron un total de 2 508 individuos, representados en ocho órdenes: *Coleoptera*, *Diptera*, *Ephemeroptera*, *Hemiptera*, *Megaloptera*, *Odonata*, *Plecoptera* y *Trichoptera*; y 28 familias: *Baetidae*, *Belostomatidae*, *Calamoceratidae*, *Calopterygidae*, *Chironomidae*, *Coenagrionidae*, *Corydalidae*, *Culicidae*, *Elmidae*, *Euthyplociidae*, *Gelastocoridae*, *Gerridae*, *Gomphidae*, *Hydropsychidae*, *Leptoceridae*, *Leptohyphidae*, *Leptophlebiidae*, *Libellulidae*, *Mesoveliidae*, *Naucoridae*, *Perlidae*, *Philopotamidae*, *Protoneuridae*, *Psephenidae*, *Ptilodactylidae*, *Simuliidae*, *Tipulidae* y *Veliidae*.

El orden *Ephemeropetera* obtuvo la mayor abundancia de organismos con 1 812, seguido de *Coleoptera* con 276, *Hemiptera* con 176, *Diptera* con 127, *Plecoptera* con 34, *Megaloptera* con 31, *Trichoptera* con 27 y *Odonata* con 25. En la figura 2 se presenta la distribución de las abundancias por orden taxonómico para cada sitio y fecha de muestreo.

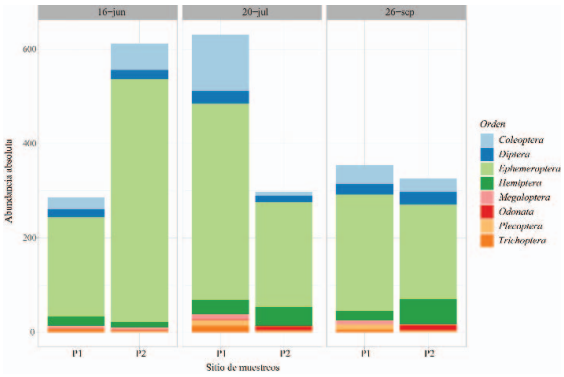


Figura 2. Distribución de las abundancias de macroinvertebrados acuáticos a nivel de orden taxonómico. Sitios de muestreo: P1 = aguas arriba; P2 = aguas abajo.

En términos relativos de la abundancia, el orden *Ephemeroptera* representa el 72.25 %, casi tres cuartas partes de los organismos recolectados. El segundo en este ranquin de abundancia es el orden *Coleoptera* con 11.00 %, un poco más de un décimo de los organismos recolectados. En estos dos órdenes juntos hay más de cuatro quintas partes de la abundancia total (Figura 3).

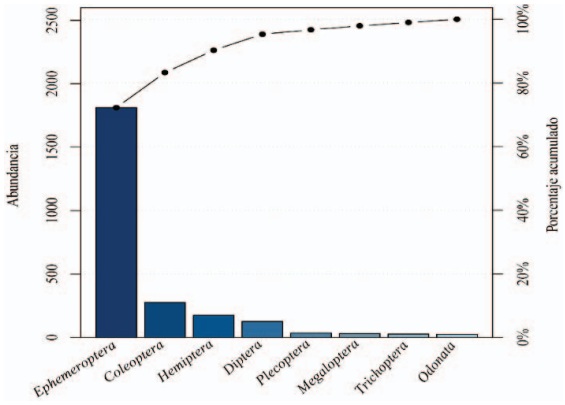


Figura 3. Distribución de las abundancias de macroinvertebrados acuáticos a nivel de Orden.

De igual forma, se obtuvo la distribución de las abundancias de macroinvertebrados acuáticos a nivel de familia taxonómica (Figura 4).

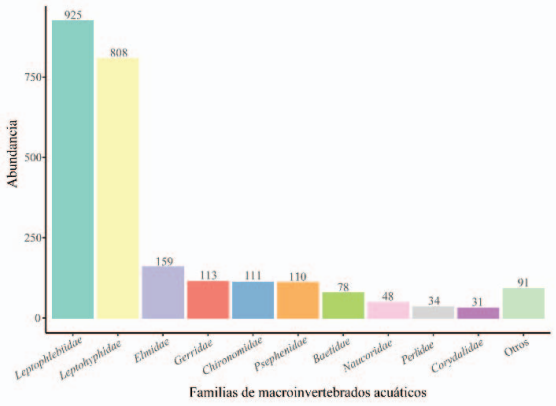


Figura 4. Distribución de las abundancias de macroinvertebrados acuáticos a nivel de familia.

Dentro del orden *Ephemeroptera*, las familias *Leptophlebiidae* y *Leptohyphidae* muestran consistentemente mayor abundancia que otros grupos taxonómicos, a través de todos los muestreos. En el orden *Coleoptera*, la familia *Elmidae* mostró una mayor abundancia a través de los muestreos realizados. Dentro del orden *Diptera* (con menos de 30 organismos recolectados por muestreo), la familia *Chironomidae* resultó ser la más representativa dentro del orden a través de los muestreos. Las familias *Gerridae* y *Naucoridae* fueron las más representativas dentro del orden Hemiptera. La familia *Hydropsychidae* fue la más representativa dentro del orden *Trichoptera*, siendo significativamente más abundante en los muestreos realizados en el sitio aguas arriba de la sección río. El orden *Megaloptera* fue poco abundante, y todos sus individuos están representados por una sola familia, *Corydalidae*. También, el orden *Plecoptera* fue poco abundante, y todos sus individuos están representados por una sola familia, *Perlidae*. El orden *Odonata* fue poco abundante. Solamente dos organismos de la familia *Coenagrionidae* se recolectaron en los muestreos del sitio aguas arriba; por el contrario, en el sitio aguas abajo, se encontró una mayor abundancia y diversidad a nivel de familia para este orden.

El ranquin de las familias más abundante lo encabeza *Leptophlebiidae* con 925 individuos, seguida de *Leptohyphidae* con 808 y *Elmidae* con 159.

B. Índices BMWP-PAN e ICA

El índice BMWP-PAN fue aplicado para determinar la calidad biológica del agua de una sección del río Ipetí. De las 28 familias reportadas, 24 presentan valores de tolerancia para el BMWP-PAN; repartidas así: la familia *Calamoceratidae* con puntaje de 9; *Calopterygidae*, *Mesoveliidae* y *Ptilodactylidae* con 7; *Corydalidae*, *Perlidae*, *Philopotamidae* y *Simuliidae* con 6; *Gomphidae* y *Leptoceridae* con 5; *Psephenidae* y *Veliidae* con 4; *Baetidae*, *Belostomatidae*, *Coenagrionidae*, *Elmidae*, *Leptohyphidae*, *Leptophlebiidae* y *Naucoridae* con 3; *Chironomidae*, *Hydropsychidae*, *Libellulidae*, *Tipulidae* con 2; *Culicidae* 1. Los cuatro *taxa* sin valor de tolerancia son: *Euthyplociidae*, *Gelastocoridae*, *Gerridae* y *Protoneuridae*.

De acuerdo con el BMWP-PAN, la calidad de las aguas en el sitio P1 se encuentra en el rango de la clase aguas contaminadas (valores de BMWP-PAN de: 50, 56 y 49); y el sitio P2, en los rangos de clases de aguas contaminadas a aguas de calidad regular (valores de BMWP-PAN de: 46, 55 y 68) (Figura 5).

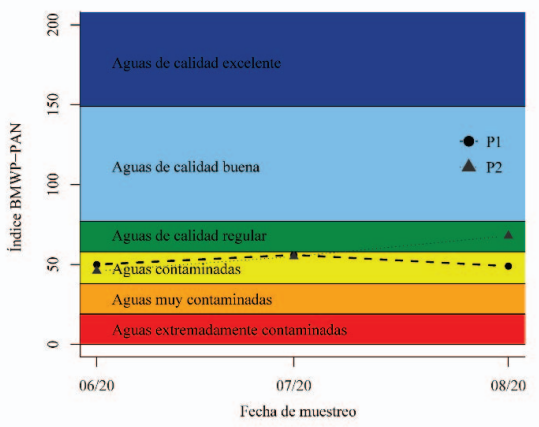


Figura 5. Calidad del agua de dos sitios del río Ipetí con base en el BMWP-PAN. Sitios de muestreo: P1 = aguas arriba; P2 = aguas abajo.

Se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica que corresponde al Índice de calidad de Agua (ICA), para contrastar con la información biológica obtenida (Figura 6).

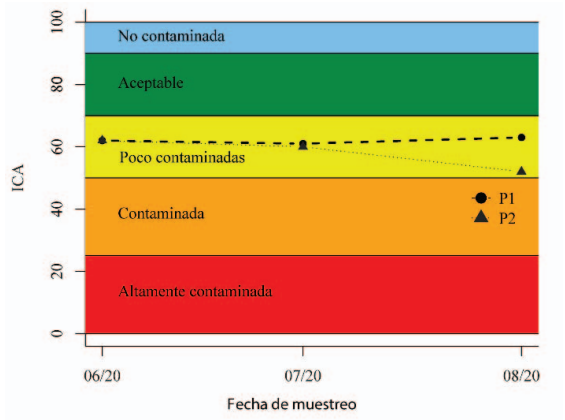


Figura 6. Calidad del agua de dos sitios del río Ipetí con base en el ICA. Sitios de muestreo: P1 = aguas arriba; P2 = aguas abajo.

Los sitios presentaron características de aguas poco contaminadas según el sistema de clasificación del ICA (puntajes de: 62, 61 y 63 para el sitio aguas arriba; y 62, 60 y 52, para aguas abajo).

Discusión

En este estudio se reporta por primera vez la fauna de macroinvertebrados bentónicos del río Ipetí. Las propiedades ecológicas, las propiedades físicas y químicas del agua, y la estructura del fondo del cauce de los dos sitios eran similares, por lo que las diferencias en la comunidad de macroinvertebrados se asocia a la calidad del agua.

Se determinó un total de 28 familias de macroinvertebrados en los muestreos realizados entre los meses de junio y septiembre del 2017. Se encontró que el orden *Ephemeroptera* era el grupo más abundante entre los macroinvertebrados bentónicos. Las familias *Leptophlebiidae* y *Leptohyphidae* son las más abundantes dentro del orden *Ephemeroptera*. La mayor abundancia del orden *Ephemeroptera* podría estar relacionada con su biología reproductiva y su capacidad de colonización [24].

En cuanto a la intensidad del muestreo, el número promedio de individuos recolectados por muestreo es de alrededor de 300; pero en el muestreo de junio en el P1 y de julio en P2 se recolectaron más de 600 individuos en cada uno. Probablemente, esta variación en el número de individuos recolectados está influenciada por eventos de lluvia que tienen un efecto de lavado del río. En los países tropicales la variabilidad en el régimen estacional de lluvias genera importantes cambios en la fauna invertebrada [25]. El aumento del caudal por las lluvias favorece el arrastre de los macroinvertebrados acuáticos por las corrientes, lo que podría causar una disminución en la abundancia de individuos [24].

El BMWP-PAN permitió clasificar la calidad del agua del río Ipetí como aguas contaminadas; pero, en el último muestreo del sitio P2, las aguas presentaron una calidad regular. Por otro lado, la evaluación con base en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos clasificó las aguas como poco contaminadas.

Existen diferencias en los sistemas de clasificación de los índices BMWP-PAN e ICA. Los nombres de las categorías de clasificación de los índices y los rangos de puntaje por categoría son diferentes entre sí; para el método BMWP-PAN existen seis clases de calidad del agua, mientras que, para el ICA, solamente cinco. También, la escala de puntaje es distinta, para BMWP-PAN un valor de puntaje puede ser mayor a 150 y para el ICA este está acotado en 100 (puntaje máximo).

Pese a ello, los resultados del índice BMWP son compatibles o consistentes con los resultados físicos y químicos en los muestreos; lo que significa, que en este caso los datos biológicos están respaldando la evaluación de la calidad del agua obtenida a través de los resultados físicos y químicos. Los parámetros físicos y químicos nos proporcionan información principalmente sobre el nivel de contaminación instantánea y podría pasar por alto la presencia de las contaminaciones de corta duración. Los datos biológicos, por la perceptibilidad que tienen las comunidades de macroinvertebrados bentónicos a las tensiones o cambios de la calidad del agua nos confirman la tendencia del régimen de contaminación (infrecuente, frecuente, constante, en aumento o disminuyendo) o de las alteraciones como inundaciones o sequías.

Otros estudios han reportado desviaciones entre las clases de la calidad del agua determinados por índices bióticos y fisicoquímicos [26]. Esto es de esperarse porque el ICA proporciona información principalmente sobre el nivel de contaminación instantánea, mientras que el BMWP-PAN representa los cambios en la carga de contaminación. Los índices bióticos responden a un complejo de factores, principalmente: la calidad del agua, el substrato y la alteración por contaminación.

La mayoría de las familias de los órdenes *Ephemeroptera*, *Coleoptera*, *Diptera* y *Heminoptera* reportadas, en una escala del uno al nueve, poseen tolerancias de magnitud tres y dos, siendo indicadores de contaminación [22]. Por otro lado, *Calamoceratidae* fue la única familia reportada con un valor de nueve para el BMWP-PAN (esta familia se caracteriza por ser muy sensible a la contaminación). Para ambos sitios, la familia *Leptophlebiidae* presentó la mayor abundancia. *Leptophlebiidae* se caracteriza por ser tolerante a la contaminación y posee un puntaje de tres [22]. Los valores más bajos de BMWP-PAN se encontraron en el mes de junio.

Conclusiones

El BMWP-PAN permitió clasificar la calidad del agua del río Ipetí y se encontró que oscila entre aguas contaminadas y calidad regular, lo cual se confirmó comparando estos resultados con el ICA, que clasificó la calidad del agua como poco contaminada.

De acuerdo con la valoración biológica, la tendencia media de la calidad del agua alcanza un puntaje de BMWP-PAN de 54 que la clasifica como aguas contaminadas, muy cerca de calidad regular. La presencia de familias de macroinvertebrados tolerantes a la contaminación como *Leptohyphidae* y *Leptophlebiidae* confirman que esta sección del río Ipetí está presentando problemas de contaminación.

La sección del río Ipetí está amenazada por los efectos de la contaminación. El aumento de la deforestación, las actividades agrícolas, ganaderas y de los asentamientos humanos se evidenció en las visitas al área de estudio. Estas actividades determinan la composición y el número de taxones de macroinvertebrados acuáticos en el río Ipetí.

En futuros estudios, esperamos realizar investigaciones desde el punto de vista de la bioindicación que evalúen el efecto de factores físicos como el tipo de substrato, o socioambientales como la precipitación y el uso de suelos, lo cual pueden apoyar y dar sustento a la elaboración de un plan de gestión del recurso hídrico para el río Ipetí, que incentive la reforestación y el manejo adecuado de los residuos; y que a corto o mediano plazo, pueda revertir el proceso de deterioro que sufre el ecosistema ribereño.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean dar las gracias a la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) por su apoyo a través del proyecto: Estudio y Diseño de un Sistema Sostenible de Saneamiento mediante humedales construidos en la comunidad de Ipetí-Emberá. De igual manera, queremos expresar nuestra gratitud a todas las personas de la comunidad indígena Ipetí que de una u otra forma apoyaron en la realización de este proyecto. Agradecemos también, a los colaboradores del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA) y del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas.

REFERENCIAS

[1] S. M. González, Y. P. Ramírez, A. M. Meza y L. G. Días, "Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua de quebradas abastecedoras del municipio de Manizales," *Boletín Científico Museo de Historia Natural*, vol. 16, no. 2, pp. 135–148, 2012.

[2] C. Villamarín, N. Prat y M. Rieradevall, "Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú," *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 42, no. 5, pp. 1072–1086, 2014.

[3] G. Roldán-Pérez, "Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua," *Academia Colombiana de Ciencia*, vol. 23, no. 88, pp. 375–387, 1999.

[4] A. Ramos-Merchante y J. Prenda, "Macroinvertebrate taxa richness uncertainty and kick sampling in the establishment of Mediterranean rivers ecological status," *Ecological Indicators*, vol. 72, pp. 1–12, 2017.

[5] P. Hanson, M. Springer y A. Ramírez, "Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos," vol. 58, Revista de Biología Tropical, 2010, pp. 3–37.

[6] R. Barba-Álvarez, G. De la Lanza-Espino, A. Contreras-Ramos y I. González-Mora, "Insectos acuáticos indicadores de calidad del agua en México: casos de estudio, ríos Copalita, Zimatán y Coyula, Oaxaca," *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 84, no. 1, pp. 381–383, 2013.

[7] R. Ladrera, M. Rieradevall y N. Prat, "Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos: Una herramienta didáctica," *Ikastorratza. e-Revista de Didáctica*, pp. 1–18, 2013.

[8] R. Selles-Pino y J. A. Vega-Bernal, "Diversidad, distribución de la comunidad de insectos acuáticos y calidad del agua de la parte alta-media del río David, provincia de Chiriquí, República de Panamá," *Gestión y Ambiente*, vol. 12, no. 3, pp. 73–84, 2009.

[9] J. Alba-Tercedor, "Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos," in *IV Simposio del agua en Andalucía (SIAGA). Almería*, 1996, vol. 2, pp. 203–213.

[10] T. Salvatierra Suárez, "Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos de la calidad del agua en el Rio Gil González y tributarios más importantes, Rivas, Nicaragua," *Universidad y Ciencia*, vol. 6, no. 9, pp. 38–46, 2012.

[11] E. Ramírez Villalobos, J. L. Rosas Acevedo, G. González, Justiniano y H. Ávila Pérez, "Insectos acuáticos como bioindicadores de la calidad del agua de manantial en Platanillo, Guerrero, México," *Revista Entomología Mexicana*, pp. 167–171, 2015.

[12] F. Correa-Araneda, R. Rivera, J. Urrutia, P. De los Ríos, Á. Contreras y F. Encina Montoya, "Efectos de una zona urbana sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos de un ecosistema fluvial del sur de Chile," *Limnetica*, vol. 29, no. 2, pp. 0183–194, 2010.

[13] G. Roldán-Pérez, "Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica," *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 40, no. 155, pp. 254–274, 2016, doi: 10.18257/raccefyn.335.

[14] ANAM, "Informe de Monitoreo de la Calidad del Agua en las Cuencas Hidrográficas de Panamá Compendio de Resultados, Años 2002 - 2008," Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá, 2009.

[15] E. Domínguez y H. R. Fernández, "Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos sudamericanos," Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales. Instituto M. Lillo, Tucumán, Argentina, 2001.

[16] G. Roldán-Pérez, "Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia," Universidad de Antioquia, Bogotá, 1988.

[17] M. Springer, "Clave taxonómica para larvas de las familias del orden *Trichoptera* (*Insecta*) de Costa Rica," *Revista de Biología Tropical*, pp. 273–286, 2006.

[18] B. Pacheco-Chaves, "Guía ilustrada para el estudio ecológico y taxonómico de los insectos acuáticos inmaduros del Orden *Odonata* en El Salvador," in *Formulación de una guía metodológica estandarizada para determinar la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando insectos acuáticos*, M. Springer y J. M. Sermeño-Chicas, Eds. San Salvador, El Salvador: Editorial Universitaria, 2010, p. 49.

[19] J. M. Sermeño-Chicas, D. Pérez y P. E. Gutiérrez-Fonseca, "Guía ilustrada para el estudio ecológico y taxonómico de los insectos acuáticos inmaduros del orden *Odonata* en el salvador," p. 38, 2010.

[20] R. Briers, *biotic: Calculation of freshwater biotic indices*. 2016.

[21] R Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

[22] A. Cornejo *et al.*, *Diagnóstico de la condición ambiental de los afluentes superficiales de Panamá*. Panamá, Panamá: Instituto Conmemorativo Gorgas de Estudios de la Salud y Ministerio de Ambiente, 2017, p. 326.

[23] R. M. Brown, N. I. McClelland, R. A. Deininger y R. G. Tozer, "A water quality index - Do we dare?" *Water and Sewage,* vol. 117, no. 10, pp. 339–343, 1970.

[24] T. Ríos, G. González y J. A. B. Vega, "Diversidad de insectos acuáticos y calidad del agua de los ríos David y Mula, provincia de Chiriquí, Panamá," *Gestión y Ambiente*, vol. 18, no. 1, pp. 113–128, 2015.

[25] H. Abarca, "El uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua," *Revista Biocenosis*, vol. 20, no. 10, pp. 95–104, 2007.

[26] M. Zeybek, H. Kalyoncu, B. Karakaş y S. Özgül, "The use of BMWP and ASPT indices for evaluation of water quality according to macroinvertebrates in Değirmendere Stream (Isparta, Turkey)," *Turkish Journal of Zoology*, vol. 38, no. 5, pp. 603–613, 2014.

Equine surface temperature before and after exercise using thermographic images

Rafaella Resende Andrade
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0003-3182-0741

Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz
Department of Agricultural Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0002-9708-0259

Diego Bedin Marin
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0001-7526-0825

Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Department of Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0001-6403-2210

Raquel Silva de Moura
Department of Animal Science
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0002-9642-1779

Rodrigo Norberto Pereira
Department of Veterinary Medicine
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0001-7545-6705

Matteo Barbari
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0002-0760-8604

Giuseppe Rossi
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0003-0211-9294

***Abstract*— Infrared thermography is considered an accurate and non-invasive method to measure animals' body surface temperature accurately. Thus, this study evaluated changes in equine surface temperature before and after exercise using infrared thermography. A 2-year-old Mangalarga mare was used and exercised once a day. Thermographic images of the animal's left side were captured before and immediately after exercise for 6 days. Subsequently, the calculation of the animal's surface temperature (ST) before and after exercise was performed in the QGIS 3.20 software. The dry-bulb temperature (t_{db}) was monitored during the collection period. Infrared thermography allowed the identification of changes in the surface temperature of the equine skin at rest and after exercise. The averages of t_{db} remained considerably above the thermoneutrality zone (above 30 °C), indicating a heat stress situation. The evaluation of the monitored total mean ST after 30 minutes of exercise showed an increase of about 1 °C in about 39% of the animal's body region. It was also observed that ST varied as a function of air temperature. It is concluded that infrared thermography proved to be a promising tool for collecting data on heat production in the equine body.**

Keywords - thermal stress, horse, image analysis, physiological parameters, thermoregulation

I. INTRODUCTION

Equines are homeothermic animals with unique athletic performance, as their survival in nature is linked to the ability to provide explosive effort while fleeing potential predators [1]. The thermal balance between tissues and organs is imperfect for resting homeothermic species due to the continuous and widely variable metabolic heat production that occurs throughout the body [2]. Through a circadian pacemaker located in the suprachiasmatic nucleus (CNS) of the anterior hypothalamus, oscillations are generated that are modulated by environmental cycles of light and dark, food availability and ambient temperature [3,4].

Physiological adjustments are essential to maintain average body temperature and avoid heat stress [1]. Sweating prevents body temperature from rising during exercise, but when weather conditions are hot or humid, exercise-induced heat stress can occur as heat production exceeds heat dissipation [5]. In environments with milder temperatures, the primary way to dissipate heat is the sensible way (conduction convection and radiation), while under heat stress, latent heat loss (evaporation) is the most efficient [6]. In addition, the heat needs to be dissipated to prevent the temperature from rising too high, endangering the animal's life. Equines control this increase through sweating, vasodilation, and tachypnea [1]. In this sense, detecting the state of the equine after exercise is essential to maximize athletic performance [7]. One of the main characteristics of equine training is the significant influence of the thermal environment on sports performance, as they are outdoor activities, thus allowing direct exposure to climatic variables [8]. Research has demonstrated how surface temperature varies with environmental conditions, body temperature and skin conditions, structures beneath the skin, and in different regions of the body [2, 9].

Infrared temperature can detect changes in peripheral blood flow and can be a useful tool to assess animal stress [10]. The use of infrared thermography (IT) is considered an accurate and non-invasive method that measures heat emission from the surface of the body of animals [11, 12]. The thermographic camera detects surface heat emitted as infrared radiation and produces an image that maps temperature differences across the target [13,14]. A standard distance between the equine's surface and the camera should be maintained for all images taken, and equines should be given time to get used to the procedure [8].

However, research relating the surface temperature of equines with the thermal environment and exercise is still scarce in the literature. This research was carried out to evaluate changes in equine surface temperature before and after exercise using infrared thermography.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00065

II. MATERIALS AND METHODS

A. Description of the location, animals and management

The animal research and ethics committee of the Federal University of Lavras (UFLA) approved all the procedures adopted in this experiment (under protocol CEUA/UFLA nº 084/16), following the ethical principle of animal experimentation.

The study was conducted at the Federal University of Lavras (UFLA), Lavras - MG, Brazil, in April 2017 (autumn), for three weeks, accounting for 6 non-consecutive days of collection (data collection days: 04/03, 04/05, 04/10, 04/12, 04/14 e 04/17). The location is at the geographic coordinates - latitude 21° 1' 43" S and longitude 44° 59' 59", an altitude of 919 meters.

For the experiment, a 2-year-old female Mangalarga equine was evaluated according to the adapted methodology [10]. The animal had dark brown fur and a body mass of ± 300 kg. The equine had never been subjected to exercise, had no visible lameness and had no signs or symptoms compatible with musculoskeletal injuries. The equine's hair was considered adequate, being fine and short.

The equine's diet consisted of 2.5 kg/animal/day of concentrate with 18% crude protein (CP) and forage (Tifton hay or corn silage), divided into two treatments at 7:30 am and 4:30 pm. Water and mineral salt ad libitum, meeting the minimum nutritional recommendations [15].

The stable where the equine was housed was oriented in the southeast-northwest direction, 28.0 m long and 9.0 m wide, with a ceiling height of 2.80 m, eaves of 1.0 m. It had a sandwich-type roofing tile. The stable was divided into twelve stalls with 18.0 m² each (average size: 4.20 m wide x 4.20 m long), without a central corridor (Fig. 1). However, for the accomplishment of the experiment, only one of the 12 available stalls was used. The stalls have the following characteristics: side walls made of concrete blocks 2.0 m high, doors 1.10 m wide and 2.0 m high. The floor of the stalls is made of concrete and has walls of concrete blocks and a bed of sawdust. Each stall has a 0.165 m³ concrete drinker and a 0.6 m³ concrete feeder. Next to the stable was the round pen 15 m in diameter with sand floor where the horses performed the exercises (Fig. 2).

Fig. 1. Facility for accommodation of the animal

B. Exercise routine according to property management

The exercises were performed three days during the week; the horses were individually exercised for 30 minutes, from 1:00 pm to 2:00 pm in the round pen.

Fig. 2. Round pen for the practice of animal exercises

The exercise routine of the horses during the experiment was divided into two parts. An initial approach consisted of placing the crow and cervical flexion. In the second part of the exercise, the animal was placed on the round pen and clockwise they walked at a pace for an average time of 11 minutes, then the animal galloped, trotted, and again walked at a pace for about one minute in each gait. The cervical flexion exercise consisted of the recruitment of deep and superficial cervical flexor muscles [16]. Exercises consisting of dynamic mobilization have a mobilizing effect on the cervical and thoracolumbar spine, in addition to activating and promoting the strengthening of the epaxial and hypaxial musculature in the cervical, thoracic and lumbar regions [17].

Then the horses were placed in an anti-clockwise direction and again followed the sequence of gait, first step, followed by gallop, trotted gait and step, spending again about a minute for each gait; at the end, the trainer in question did an approach to stop the animals and cervical flexion. The animals were bathed on the spot using a hose and the animals' bodies were completely wet.

C. Thermal environment

To evaluate the thermal environment where the equine was inserted, the dry bulb temperature (t_{db}, °C) and relative humidity (RH) were measured daily at central points within the stall and round pen. The t_{db} data were measured and stored using sensors/recorders (Hobos Pro Series, Onset®) with an accuracy of ± 3%. t_{db} and RH collections were performed every 5 minutes, 24 hours a day, over six non-consecutive days.

The sensors used were protected and stored inside cages to prevent the animals from damaging them and kept at the height of 2.0 m from the floor to better characterize the microclimate in which they were exposed. A recording sensor was installed in the center of the round pen; another sensor was installed in the place where the animals were bathed with hoses.

Subsequently, the Temperature and Humidity Index (THI) was calculated from the model proposed by Thom [18], as described in equation 1. The THI was used as an estimate of the degree of discomfort experienced by horses.

$$THI = 0{,}8.\, t_{db} \; + \; \text{RH}.\left(\frac{t_{bs}\; -14.4}{100}\right) \; + 46.4 \qquad (1)$$

D. Surface temperature

For the analysis of the surface temperature (ST) of the animal, a 320 x 240 pixels Fluke Ti55 thermographic camera was used, with an infrared spectrum range of 8 µm to 14 µm, an accuracy of ± 2 °C and an emissivity of 0.98 (Fig. 3). Images were obtained on non-consecutive days for 3 weeks by a trained examiner 1 m away from the animal, perpendicular to the animal's left side. The animal was evaluated for two days before the exercise, at 12:00, and immediately after the 30-minute exercise.

The animal's ST calculation before and after the exercise was performed in the QGIS 3.20 software. For this, a 4-step workflow was performed. In the first step, the images were exported from the standard SmartView Classic 4.4 camera software to QGIS. In the second step, vectors of the contour of the animal were created and used to cut the images and remove the influence of the image background in the calculation of the ST of the animal (Fig. 4). In the third step, the ST values of the pixels present in each of the cropped images were extracted. In the fourth and last step, the pixel values were quantified in pre-defined class intervals to obtain the area of the animal with different ST. The animal ST ranges were defined in 6 classes: 35 to 36 °C; 36.01 at 37 °C; 37.01 at 38°C; 38.01 at 39°C; 39.01 at 40 °C and 40.01 at 41 °C.

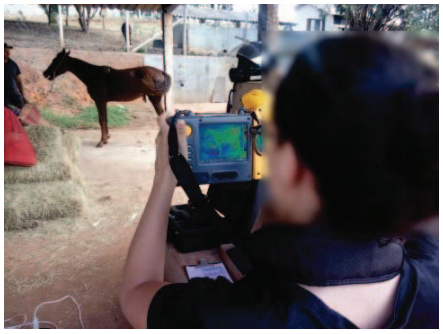


Fig. 3. Examiner capturing images 1 m away from the animal, perpendicular to the animal's left side

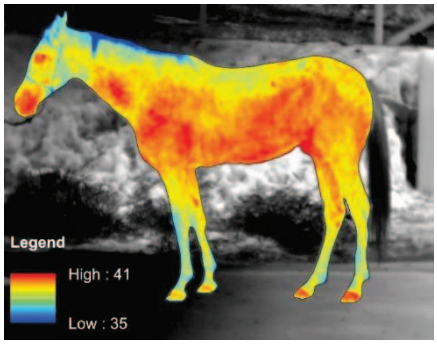


Fig. 4. Thermographic image of the outline of the animal after exercise

III. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 5 shows the percentage of the area of the animal (%) in the classes of average surface temperature (°C); and dry bulb temperature variation (t_{db}, °C) before and after exercise, in autumn.

It is observed that during the evaluated days 04/03, 04/05, 04/12, 04/14 and 04/17 the t_{db} maintained mean values close to 30 °C and 35 °C, before and after the exercises, respectively. On the third day evaluated (04/10), higher mean values of t_{db} were observed near 32 °C and 42 °C before and after the exercises, respectively. After the exercise, t_{db} was measured on the external side (round pen), the place with the greatest exposure to solar radiation. The averages of t_{db} remained considerably above the thermoneutrality zone, above the range between 5 and 25 ºC cited Morgan [19] and Lewis [20] as being comfortable for equines. It was also possible to verify that the ambient temperature, regardless of the period analyzed, exceeded the thermoneutrality zone of the animal, being subjected to levels of heat stress.

Fig. 6 shows the Temperature-Humidity Index (THI) observed during six days in autumn, before and after the exercise. THI values up to 70 indicate a non-stressful environment, between 71 and 78 critical, between 79 and 83 dangerous and above 83, an emergency condition [21]. It is observed that during the evaluated days 04/03, 04/05, 04/12, 04/14 and 04/17 the THI maintained values above thermoneutrality (in the range of values considered as critical). Similar to t_{db}, the highest THI values were found on the third day (04/10) of evaluation, higher mean values of t_{db} were observed near 76 and 87 before and after the exercises, respectively.

Graciano [22] mentions that heat is one of the main limiting factors in the production of animals in the tropics since there are significant changes in the biological functions of the animal. According to the same author, due to heat stress, there is an increase in rectal temperature, skin and hair, sweating and respiratory and heart rates, as well as a reduction in water loss in feces and urine. Dysfunctions in protein, energy and mineral metabolism, as well as disturbances in enzymatic reactions and hormone secretion. In addition, the expenditure of energy to eliminate the animal's body heat is verified. Heat loss occurs mainly by evaporation associated with the loss of water vapor from the surface of the body and the respiratory system [23].

Concerning the moment of rest, the mean total ST monitored after 30 minutes of exercise, showed an increase of about 1°C for 39% of the animal's body region. Among the quantification of the highest ST values, at rest, it was possible to observe that 51% of the animal's body region presented a ST variation from 36.01 to 37 °C; and 28% of the animal's body region showed a ST variation from 37.01 to 38 °C. After exercise, 39% of the animal's body region showed a ST variation from 36.01 to 37 °C; and 32% of the animal's body region showed a ST variation from 38.01 to 39 °C.

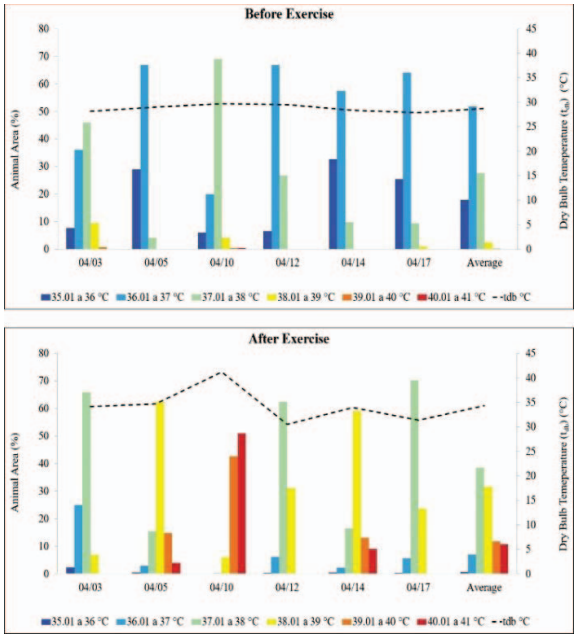


Fig. 5. Percentage of the animal's area (%) in the average surface temperature classes (°C); and variation of the dry bulb temperature (t_{db}, °C), for six days in autumn, before and after the exercise.

Simultaneously, it was possible to observe (Fig. 5) that for all the days evaluated, after the performance of the exercises, the equine presented higher values of ST when compared to the moment of rest. Similar behavior was observed in research carried out Moura *et al*., [10]; the authors evaluated the use of infrared thermography in equine thermoregulation after the exercise condition. It was concluded that exercise increased the equine's body heat production.

It was also possible to observe that the ST had a higher value on the third day, probably due to the higher t_{db} value found for that day; that is, it demonstrated an increase in ST as the t_{db} increased. These results confirm the direct relationship between body and environmental temperature, highlighting the strong effect of the thermal environment on equines, which can modify their physiological response in a given situation.

When animals are exercised, oxygen consumption and carbon dioxide production increase, and respiratory rate increases to keep up with changes. Consequently, during moderate exercise with satisfactory preconditioning, little difference is noted in PaO_2 (partial pressure of O_2 in arterial blood), $PaCO_2$ (partial pressure of carbon dioxide), and arterial pH [22]. When exercise takes place in environments where the temperature and/or humidity are high, the competitive demands of evaporative cooling and energy production can limit performance and, depending on the case, result in severe disturbances associated with high temperatures [24].

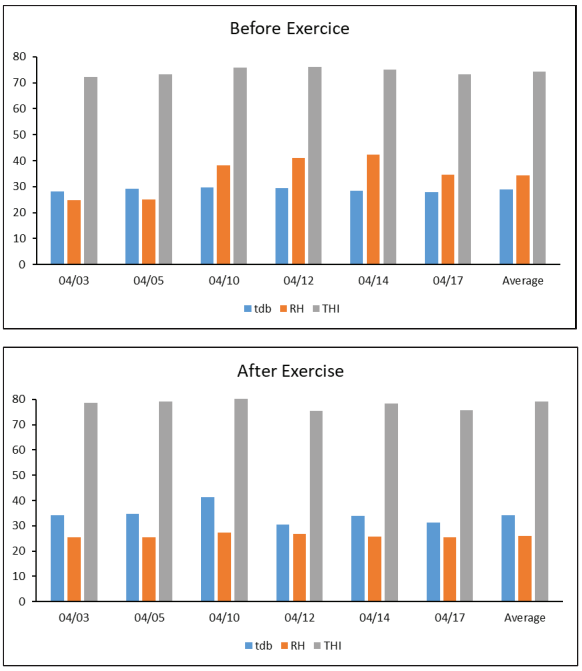


Fig. 6. Dry bulb temperature (t_{db}, °C), Relative Humidity (RH, %) and Temperature-Humidity Index (THI) observed during six days in autumn, before and after the exercise

IV. CONCLUSIONS

Individual surface temperature assessment using infrared thermography proved to be a promising tool for collecting data on equine body heat production. This tool made it possible to identify changes in skin temperature at rest and after exercise. The evaluation of the total mean surface temperature monitored after 30 minutes of exercise showed an increase of about 1°C for 39% of the animal's body region. It was also observed that the surface temperature varied as a function of the air temperature. However, further studies should be carried out on a more significant number of horses and during competitions to ascertain our preliminary findings. The averages of t_{db} and THI remained considerably above the thermoneutrality zone, indicating a heat stress situation.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Universidade Federal de Lavras (UFLA/Brazil) for the support and supply of equipment for the development of this research; and Università degli Studi di Firenze (UNIFI/Italy). This work was carried out with the support of CNPq, National Council for Scientific and Technological Development – Brazil.

REFERENCES

[1] D. R. Hodgson, C. M. McGowan, and K. McKeever, *The athletic horse: principles and practice of equine sports medicine*. Elsevier Health Sciences, 2013.

[2] N. A. Taylor, M. J. Tipton, and G. P. Kenny, "Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures," *Journal of thermal biology*, vol. 46, Dec., pp. 72-101, 2014.

[3] J. V. Ware, O. L. Nelson, C. T. Robbins, and T. H. Jansen, "Temporal organization of activity in the brown bear (Ursus arctos): roles of circadian rhythms, light, and food entrainment," *American Journal of*

Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, vol. 303, no. 9, pp. 890-902, Nov. 2012.

[4] D. F. Patton, R. E. Mistlberger, "Adaptações circadianas ao horário das refeições: mecanismos neuroendócrinos," *Frontiers in neuroscience*, vol. 7, pp. 185, 2013.

[5] T. Art, and P. Lekeux, "Exercise-induced physiological adjustments to stressful conditions in sports horses," *Livestock Production Science*, vol. 92, no. 2, Feb., pp. 101-11, 2005.

[6] M. Perissonoto, D. J. Moura, S. V. Matarazzo, I. J. O. Silva, and K. A. O. Lima, "Efeito da utilização de sistemas de climatização nos parâmetros fisiológicos do gado leiteiro," *Engenharia Agrícola*, vol. 26, no. 3, Sep., p. 663-671, 2006.

[7] M. Domino, M. Borowska, N. Kozłowska, A. Trojakowska, L. Zdrojkowski, T. Jasiński, G. Smyth, and M. Maśko, "Selection of image texture analysis and color model in the advanced image processing of thermal images of horses following exercise," *Animals*, vol. 12, no. 4, Feb., pp. 44, 2022.

[8] G. H. M. Jørgensen, C. M. Mejdell, and K. E. Bøe, "Effects of hair coat characteristics on radiant surface temperature in horses," *Journal of Thermal Biology,* vol. 87, Nov., pp. 102474, 2020.

[9] K. A. Engebretsen, J. D. Johansen, S. Kezic, A. Linneberg, and J.P. Thyssen, "The effect of environmental humidity and temperature on skin barrier function and dermatitis," *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, vol. 30, no. 2, Oct., pp. 223-249, 2016.

[10] D. J. D. Moura, A. P. D. A. Maia, R. D. A. Vercellino, B. B. L. Medeiros, J. Sarubbi, and P. R. Griska, "Infrared Thermography to Evaluate the Training Horse Thermoregulation," *Engenharia Agrícola*, vol. 31, no. 1, Jan., p. 23-32, 2011.

[11] A. L. Eddy, L. M. Van Hoogmoed, and J. R. Snyder, "The role of thermography in the management of equine lameness," *The Veterinary Joumal,* vol. 162, no. 3, Nov., pp. 172-181, 2001.

[12] R. R. Andrade, I. F. F. Tinôco, F. C. Baêta, M. Barbari, L. Conti, P. R. Cecon, M. G. L. Cândido, I. T. A Martins, and C. G. S. Teles Junior, "Evaluation of the surface temperature of laying hens in different thermal environments during the initial stage of age based on thermographic images," *Agronomy Research*, vol. 15, no. 3, p. 629-638, 2017.

[13] E. L. Dereniak, and G.D. Boreman, *Infrared detectors and systems*. New York, NY: Wiley-Interscience, 1996.

[14] M. Soroko, and K. Howell, "Infrared thermography: Current applications in equine medicine," *Journal of Equine Veterinary Science*, vol. 60, Jan., pp. 90-96, 2018.

[15] National Research Council, *Nutrients requirements of domestic horses*, 6th ed., Washington: National Academy of Scince, 2007.

[16] D. Falla, "Unravelling the complexity of muscle impairment in chronic neck pain," *Manual therapy*, vol. 9, n. 3, Aug., pp. 125-133, 2004.

[17] H. M. Clayton, L. J. Kaiser, M. Lavagnino, and N. C. Stubbs, "Dynamic mobilisations in cervical flexion: Effects on intervertebral angulations," *Equine Veterinary Journal*, vol. 42, Nov., pp. 688-694, 2010.

[18] E. C. Thom, E. C. The discomfort index. Weatherwise, vol. 1, pp. 57–59.

[19] K. Morgan, Short-term thermoregulatory responses of horses to brief changes in ambient temperature. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 1996.

[20] L. D. Lewis, *Feeding and care of the horse*. Philadelphia, PA: Williams & Wilkins, 1995.

[21] F.C. Baêta, C.F. Souza. Ambiência em edificações rurais: conforto ambiental. 2. ed. Viçosa, Brasil: Editora UFV. pp. 269, 2010.

[22] D. E. Graciano, "Aplicações da termografia infravermelha na produção animal" M. S. thesis, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2013.

[23] J. A. Clark, A. J. McArthur, "Thermal exchanges," in: Livestock housing, Wathes, C. M. Charles, D. R, Ed. CAB International: Wallingford, UK, 1994, pp. 97–122.

[24] W. O. Reece, H. H. Erickson, J. P. Goff, and E. E. Uemura, *Dukes' physiology of domestic animals*. John Wiley & Sons, 2015.

Healing plants in the traditional medicine of the Ngäbe-Buglé ethnic group: a preliminary ethnobotanical study

Plantas curativas en la medicina tradicional de la etnia Ngäbe-Buglé: un estudio etnobotánico preliminar

José Ulises Jiménez
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ulises.jimenez@utp.ac.pa

Kleveer Abilio Espino Cedeño
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
kleveer.espino@utp.ac.pa

José Rogelio Fábrega Duque
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

Abelardo del Carmen Franco Chávez
Centro Regional De Bocas Del Toro
Universidad Tecnológica de Panamá
Changuinola, Panamá
abelardo.franco@utp.ac.pa

Wedleys Walker Tejedor Espinosa
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
wedleys.tejedor@utp.ac.pa

Brenda Cecilia Serracín
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
brenda.serracin@utp.ac.pa

Dafni Y. Mora G.
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
dafni.mora@utp.ac.pa

Ana Cristina González Valoys
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ana.gonzalez1@utp.ac.pa

***Abstract* — It is an ethnobotanical research that deals with the rescue of the traditional knowledge of the Ngäbe-Buglé ethnic group and the use of native medicinal plants in the community of Santa Marta, district of Jirondai, corregimiento of Tu gwai, Ñokribo region, Comarca Ngäbe-Buglé. Ngäbe-Buglé knowledge about the healing properties of plants is being lost within the environment of the different communities of the indigenous ethnic group. The objective of this study is to begin to record, validate and accredit the traditional use of indigenous medicinal plants by the Ngäbe-Buglé culture and to create an ethnobotanical database for the community. With the quantitative ethnobotanical index of Informe de Uso, the importance of 17 plant species used in Ngäbe-Buglé traditional medicine was described. The ethnobotanical evidence will be used for further studies to identify active ingredients for medicines.**

Keywords — Ethnobotany, Ngäbe-Buglé, medicinal plants, indigenous ethnicity, livelihood, traditional knowledge

***Resumen* — Es una investigación etnobotánica que trata sobre el rescate del conocimiento tradicional de la etnia Ngäbe-Buglé y de la utilización de plantas medicinales nativas en la comunidad de Santa Marta, distrito comarcal de Jirondai, corregimiento de Tu gwai, Región de Ñokribo, Comarca Ngäbe-Buglé. El conocimiento Ngäbe-Buglé acerca de las propiedades curativas de las plantas se está perdiendo dentro del entorno de las distintas comunidades de la etnia indígena. El objetivo de este estudio es comenzar a registrar, validar y acreditar el uso tradicional de las plantas medicinales autóctonas por la cultura Ngäbe-Buglé y crear una base de datos etnobotánicos para la comunidad. Con el índice cuantitativo etnobotánico de Informe de Uso se describió la importancia de 17 especies de plantas empleadas en la medicina tradicional Ngäbe-Buglé. Las evidencias etnobotánicas servirán para posteriores estudios de identificación de principios activos para medicamentos.**

Palabras claves — etnobotánica, Ngäbe-Buglé, plantas medicinales, etnia indígena, modo de vida, conocimiento tradicional

I. INTRODUCCIÓN

El uso de plantas para tratar enfermedades o sus síntomas se ha practicado por todas las civilizaciones y culturas desde tiempos remotos [1]. La medicina tradicional Ngäbe-Buglé ha utilizado plantas curativas para tratar trastornos de la salud y prevenir enfermedades a lo largo de los siglos. El conocimiento Ngäbe-Buglé acerca de las propiedades curativas de las plantas se ha transmitido de generación en generación; tanto dentro de la comunidad, como entre las distintas comunidades en el entorno de la etnia indígena.

La práctica de la medicina tradicional Ngäbe-Buglé, junto con toda su sabiduría y misticismo se va perdiendo entre los jóvenes de la comunidad indígena, quizás producto de la influencia del modernismo. Las nuevas generaciones no encuentran los espacios, ni el tiempo que se requiere para aprender todo ese cúmulo de conocimiento enraizado en las costumbres y tradiciones Ngäbe-Buglé. Esta iniciativa de estudiar las plantas medicinales surgió de la necesidad que tienen los pobladores de Santa Marta de rescatar su sabiduría indígena.

Las investigaciones etnobotánicas son muy importantes para entender la cultura de una sociedad; además,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00066

proporcionan una línea base para estudios posteriores en otras disciplinas científicas [2]. El conocimiento etnobotánico de las plantas medicinales se concentra principalmente en las áreas rurales apartadas del país donde viven los grupos indígenas [3]. A pesar de la gran diversidad cultural y biológica con que cuenta Panamá, son muy pocos los estudios etnobotánicos realizados, según evidencian las escasas publicaciones de artículos científicos indexados en *Scopus* y *Web of Science* [4].

La oportunidad de investigación sobre las plantas medicinales en la comunidad de Santa Marta nace de reuniones y acuerdos entre autoridades y profesores de la Universidad Tecnológica de Panamá, dirigentes indígenas y un grupo de botánicos. En este contexto, "botánicos" se refiere a las personas que conocen y utilizan las plantas con fines curativos. Los Ngäbe usan de preferencia la palabra botánico en lugar de curanderos o chamanes; ya que en su lengua la palabra *sukia* significa el sabio que conoce de las plantas y su poder curativo.

De las conversaciones se esbozaron tres premisas que justificaban la realización de estudios etnobotánicos con el consentimiento de la comunidad de Santa Marta: primero, que el conocimiento del uso de plantas curativas autóctonas se encuentra actualmente resguardado en pocas personas y que la mayoría de ellas son adultos mayores; segundo, que existe el propósito de compartir y traspasar este conocimiento local de las plantas curativas locales a todos los miembros de la comunidad y muy especialmente a los más jóvenes; y último, que la incorporación de este conocimiento significaría una habilidad para la supervivencia en la pobreza rural y una posible fuente de oportunidades económicas para las nuevas generaciones, lo que puede permitir una administración más sostenible de su entorno natural.

Los botánicos de Santa Marta mantienen en funcionamiento un Centro de Atención de Medicina Alternativo, llamado *Iho Kebery*, en honor a un personaje botánico llamado *Iho* quien poseía un profuso conocimiento místico de las plantas medicinales. El término en lengua ngäbere *kebe* significa camarón y *ry*, quebrada; aludiendo al lugar donde vivía: "Iho de quebrada camarón".

Los botánicos buscan las plantas en el bosque para tratar los trastornos de salud que puedan contraer los miembros de su comunidad; incluso, han incorporado plantas exóticas que crecen en los predios de sus hogares para diversificar su arsenal farmacológico. También, cultivan un jardín de plantas medicinales nativas en el Centro *Iho Kebery* para facilitar la obtención del material. Con base en las plantas que crecen en su localidad pueden combatir una extensa variedad de enfermedades.

El término de plantas medicinales se refiere a aquellas plantas que se utilizan para tratar enfermedades en personas o animales. Generalmente, no se utiliza toda la planta, sino solamente algún órgano: raíz, tallo, hojas, flores o frutos; donde el principio activo o los principios activos, sustancias químicas, se encuentra en mayor concentración. Estas plantas medicinales se consideran recursos ricos en ingredientes que pueden usarse en el desarrollo y síntesis de medicamentos.

La etnobotánica es la disciplina que documenta la diversidad del uso de plantas por parte de una población local, estudia la interacción dinámica entre personas y plantas, y se centra en comprender cómo y por qué las personas seleccionan y usan las plantas [5].

Las plantas medicinales tienen un futuro prometedor; hay alrededor de medio millón de plantas en todo el mundo y muchas de ellas presentan principios químicos activos de uso medicinal que aún no han sido estudiados, y que podrían ser la respuesta decisiva al tratamiento de tantas enfermedades [5].

En la actualidad, el uso de plantas medicinales por los miembros de la comunidad indígena se convierte en algo imperativo debido a que las condiciones de pobreza existentes en estas áreas rurales hacen casi imposible contar con los recursos monetarios para movilizarse y acudir a un centro médico convencional. Las plantas medicinales tienen un rol esencial en zonas rurales con pocos ingresos familiares [6]. Los estudios etnobotánicos modernos contienen en su desarrollo, aspectos relacionados con las interacciones entre el hombre y su entorno, originando gran cantidad de información relevante para abordar y resolver problemas tanto ambientales, como sociales [2].

Las plantas medicinales juegan un papel crítico en el desarrollo de las tradiciones y creencias de los pueblos indígenas. Estudiar estas plantas en la comunidad de Santa Marta supone un valioso aporte al registro del conocimiento indígena Ngäbe-Buglé y nos ayuda a comprender su cultura y su modo de vida.

Los bosques que rodean la comunidad de Santa Marta son poseedores de una elevada diversidad de especies de plantas, circunstancia o ingrediente que ha contribuido a la incubación de un considerable cúmulo de conocimientos tradicionales asociados a sus usos, entre estos los usos medicinales. Aquí, los estudios etnobotánicos pueden ser claves para preservar la diversidad de plantas. La etnobotánica es reconocida como la ciencia de la supervivencia, ya que la comprensión y el entendimiento que se posea sobre los conocimientos de los beneficios de plantas permite su uso de manera sustentable [7].

Este estudio trata sobre el rescate del conocimiento tradicional indígena; particularmente, de la utilización de plantas medicinales nativas en la comunidad de Santa Marta dentro de la Comarca Ngäbe-Buglé. Concretamente, es un estudio etnobotánico descriptivo con énfasis en lo taxonómico y cuantitativo, y que busca contribuir al reconocimiento de la cultura Ngäbe-Buglé en cuanto a su relación con las plantas.

II. METODOLOGÍA

Este trabajo comenzó con una serie de reuniones entre autoridades de la Universidad Tecnológica de Panamá y líderes locales de la comunidad Ngäbe-Buglé de Santa Marta, las cuales fueron claves para lograr el consentimiento previo y unánime de los botánicos. Esto permitió una visita para mostrar la posibilidad de realizar una investigación etnobotánica la cual se presentó como un curso taller con una duración de cuatro días.

A. Sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en la comunidad de Santa Marta, corregimiento de Tu gwai, distrito comarcal de Jirondai, Región de Ñokribo, Comarca Ngäbe-Buglé, República de Panamá (figura 1). La Comarca Ngäbe-Buglé es la región indígena más poblada de Panamá, con más de 200.000 personas [8]. La Comarca Ngäbe-Buglé presenta condiciones de pobreza multidimensionales alarmantes (93,4%) los más altos del país [8]. La principal fuente de ingreso de la comunidad de Santa Marta es la agricultura.

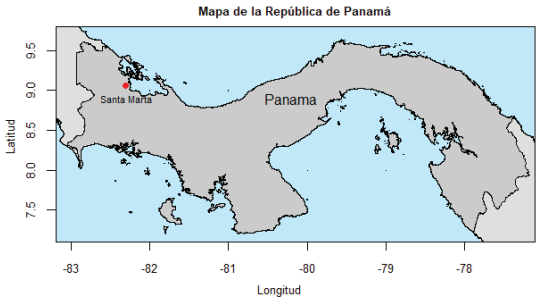


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.

B. *Campaña de muestreo*

Se realizó una recolección de material vegetal para identificación taxonómica en los bosques utilizados por la comunidad los días 26 y 27 de octubre de 2021, en compañía de Mainor Martínez, Mauricio Martínez (informante) y otros 16 pobladores de Santa Marta. La técnica empleada se conoce como visita guiada, que consiste en recorrer el bosque con uno o varios informantes para observar in situ las plantas y recolectar muestras [9]. La visita guiada se hizo a modo de paseo por los senderos del bosque y los participantes ayudaron en la recolección de las muestras de plantas. Se usaron varas, tijeras, biombo y bolsas en la recolección; además, se anotaron en un cuaderno de campo las características que pudiesen perderse en la preparación del material vegetal y se tomaron fotos de la planta completa y de sus partes. Se utilizaron prensas, cartones, papel periódico y correas para preparar el material. Las plantas prensadas se secaron al sol y posteriormente, se llevaron a una secadora.

C. *Identificación de muestras*

Se usaron las claves taxonómicas de la flora de Panamá y un estereoscopio para la identificación hasta especie del material que no fue identificado en campo. El material preparado se comparó con material de herbario. Las plantas fueron identificadas por José Ulises Jiménez.

D. *Entrevista*

Se diseñó una encuesta, la que luego se aplicó de forma individual y aislada a cada uno de los tres informantes botánicos participantes, mediante la técnica de entrevista guiada semiestructurada, el día 28 de octubre de 2021. La entrevista se realizó en la lengua Ngäbe-Buglé y traducida de manera simultánea al idioma español por Mainor Martínez.

La entrevista sirvió para recolectar información sobre los usos curativos de 17 plantas, que fueron seleccionadas al azar de un total de 70 plantas. Se anotó debidamente para cada una de las plantas: el nombre común, las enfermedades en la que se usa, si se usa toda la planta o una parte específica de ella, la forma en la que se prepara el remedio y la manera en la que se aplica el tratamiento.

E. *Análisis de los datos*

El análisis de datos se dio exclusivamente con base en plantas nativas con uso curativo conocidas por los botánicos Ngäbe-Buglé, de la comunidad de Santa Marta. Se creó una base de datos etnobotánicos y se clasificaron las plantas medicinales de acuerdo con las propiedades curativas que nos hicieron saber los entrevistados. También, se clasificaron las plantas según su forma de vida en: hierbas, arbustos, árboles, palmas y bejucos.

Las categorías generales de uso de las plantas medicinales utilizadas fueron: Trastornos gastrointestinales (TGI), Enfermedades dermatológicas (ED), Problemas urogenitales y ginecológicos (PUG), Trastornos esqueleto-musculares (TEM), Enfermedades médicas internas (EMI), Problemas respiratorios, oído y boca (PROB), Mordida y picadura de animales (MA), Enfermedades infantiles (EI) y Otros trastornos (OT).

Se evaluó el conocimiento local de los *taxa* de planta con base en el consenso de los informantes utilizando el índice de informe de uso (UR, por sus siglas en inglés). El UR por especie se calcula sumando todas las veces que los informantes individuales nombraron la especie para una categoría de uso específica [10]. La UR por especie es la suma de todas las veces que los entrevistados individuales nombraron la especie para una categoría y la suma de todas esas categorías [10]. El UR cuantifica la información etnobotánica. Los análisis se realizaron usando los programas R [11] y RStudio [12] y el paquete ethnobotanyR [10]. Las relaciones entre las categorías de uso y las especies, y entre las categorías de uso y los informantes se muestran mediante diagramas circulares. Por último, se resume toda la información del UR en un diagrama aluvial.

III. Resultados

Los informantes responden a los nombres de: Elicia Martínez, Mauricio Martínez y Viviana Montero. La edad de los informantes oscila entre 66 y 79 años. Estas tres personas poseen una gran reputación como sabios de las plantas medicinales autóctonas en el ámbito de su comunidad, por lo que se estableció que la información proporcionada por ellos sobre las plantas medicinales es fiable.

Este estudio preliminar incluye 17 especies de plantas pertenecientes a 17 géneros y 16 familias. Los hábitos de las plantas corresponden a: hierbas (10), bejucos (2), arbusto (1), árboles (3) y con apariencia de palma (1).

Seguidamente, mostramos los nombres científicos y en lengua ngäbere de las plantas utilizadas en las entrevistas: *Aphelandra aurantiaca* (nimodä dïbo grögue), *Aristolochia* sp. (cülebra köy), *Begonia semiovata* (gzolön), *Bellucia pentamera* (uröno), *Calathea micans* (krïgo, efüdua kia, uöngo timiendä), *Columnea nicaraguensis* (baba koy cüinday, jacobö diga koy, küi alan, drbe gnüredu), *Costus allenii* (miguingä), *Dorstenia choconiana* (tubö timie), *Dracontium spruceanum* (culebra töi, icha töi), *Episcia lilacina* (migän koyre, zulia wüata be köy), *Passiflora vitifolia* (culebra koy grüo), *Piper auritum* (ngamüo), *Sabicea panamensis* (ngublurö), *Senna bacillaris* (müma grie, mumälan), *Trattinnickia aspera* (ngündo grie), *Xiphidium caeruleum* (ngöruo), *Zamia neurophyllidia* (titü timiendä).

Se informa del uso de estas especies en 51 propósitos medicinales distintos, clasificados dentro de nueve categorías generales de uso medicinal.

A continuación, se presentan las afecciones y enfermedades mencionadas en las entrevistas. Cada una de estas enfermedades fue clasificada dentro de una de las nueve categorías generales (ver tabla 1).

TABLA I. CATEGORÍAS DE USO DE LAS PLANTAS MEDICINALES

Categoría General	Enfermedades y afecciones a la salud
TGI	Ameba (amebiasis), diarrea, dolor de barriga (cólico), hepatitis, vómito, úlcera.
ED	Alergia (*rash*), granos, irritación en la piel, picaduras, picazón (urticaria).
PUG	Dolor en riñones - dolor renal (nefralgia), dolor menstrual (cólico menstrual) (dismenorrea), flujo vaginal blanco (candidiasis), infección en los riñones (nefritis), mal de orine (cistitis), obstrucción urinaria, piedra en la vesícula (colelitiasis), sangre en orina (hematuria), mejorar la menstruación, parto.
TEM	Dolor en la cintura, dolor en los hombros, dolor en los huesos (reumatismo), pasmo (espasmo muscular).
EMI	Anemia, cansancio en el estómago (fatiga), desmayo (síncope), diabetes, estreñimiento, falta de apetito (anorexia), hemorroides, mal sueño (insomnio), mareo, nausea, pesadilla, presión alta (hipertensión), sangre en las heces (hematoquecia).
PROB	Agitación (taquipnea), COVID-19, dolor de muela, mal sabor de boca (halitosis), respiración corta (disnea), ruido en el oído, ruido en la cabeza (tinnitus), tosferina (tos).
MA	Mordida de ofidio, picadura de alacrán (alacranismo).
EI	Babeo (sialorrea), mal en el ombligo (onfalitis), papera (parotitis).
OT	Conjuntivitis, desnutrición, dolor de cuerpo, espíritu malo, estrés en el cuerpo (debilidad corporal) fiebre, hinchazón de cuerpo (edema corporal).

Las categorías generales de uso medicinal son: trastornos gastrointestinales (TGI); enfermedades dermatológicas (ED); problemas urogenitales y ginecológicos (PUG); trastornos esqueleto-musculares (TEM); enfermedades médicas internas (EMI); problemas respiratorios, oído y boca (PROB); enfermedades infantiles (EI); mordida y picadura de animales (MA) y otros trastornos (OT).

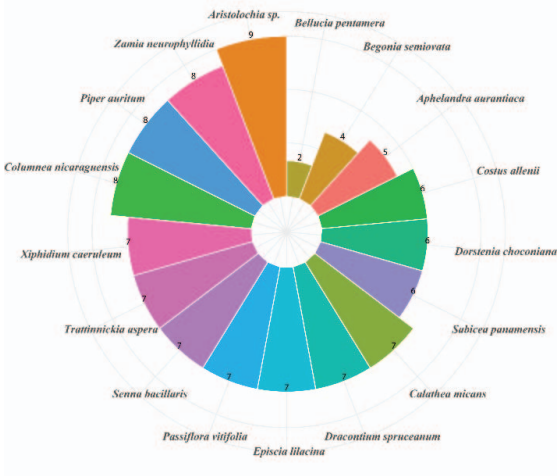


Figura 2. Informe de uso por especie.

La figura 2 muestra los resultados del análisis de informe de uso por especie. Hubo un total de 111 informes de uso medicinal (UR_{total} = 111). La especie más nombrada fue *Aristolochia* sp. con un UR de 9 y la menos nombrada fue *Bellucia pentamera*, con un UR de 2. El 82% de las plantas fue nombrada seis o más veces para alguna de las categorías de uso medicinal.

La mayoría de las plantas presentadas se usan para tratar trastornos gastrointestinales (ej. amebiasis, diarrea, dolor de barriga, hepatitis, vómito, úlcera) con 27.0 % del UR; y otros trastornos (ej. conjuntivitis, desnutrición, dolor de cuerpo, espíritu malo, estrés en el cuerpo, fiebre e hinchazón del cuerpo) con un 25.2 % del UR (figura 3).

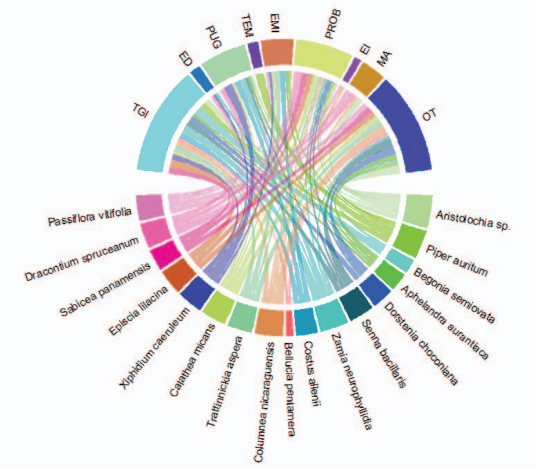


Figura 3. Distribución del UR con relación a cada especie. Se muestran las nueve categorías generales de uso medicinal (mitad superior) relacionadas con cada una de las 17 especies de plantas (mitad inferior).Las categorías generales de uso medicinal son (de izquierda a derecha): trastornos gastrointestinales (TGI); enfermedades dermatológicas (ED); problemas urogenitales y ginecológicos (PUG); trastornos esqueleto-musculares (TEM); enfermedades médicas internas (EMI); problemas respiratorios, oído y boca (PROB); enfermedades infantiles (EI); mordida y picadura de animales (MA) y otros trastornos (OT).

Viviana informó más usos medicinales para las plantas con un 37 % del UR, seguida de Elicia con un 33 % y Mauricio con un 30 % (figura 4).

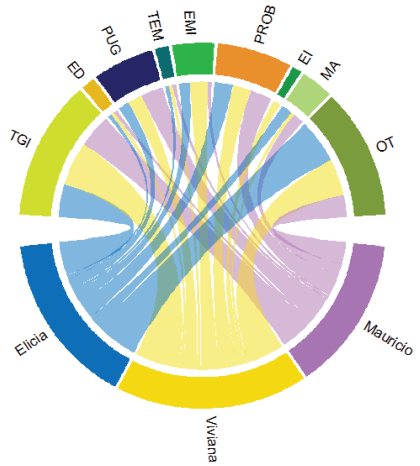


Figura 4. Distribución del UR con relación a los informantes. Se muestran las nueve categorías generales de uso medicinal (mitad superior) relacionadas con cada uno de los tres informantes (mitad inferior). Las categorías generales de uso medicinal son (de izquierda a derecha): trastornos gastrointestinales (TGI); enfermedades dermatológicas (ED); problemas urogenitales y ginecológicos (PUG); trastornos esqueleto-musculares (TEM); enfermedades médicas internas (EMI); problemas respiratorios, oído y boca (PROB); enfermedades infantiles (EI); mordida y picadura de animales (MA) y otros trastornos (OT).

La figura 5 presenta un diagrama aluvial que resume toda la información del índice UR. Se muestra cómo se relacionan los tres elementos: uso, especie y botánico (informante). Cada especie de planta está identificada con un color distinto. El ancho de las líneas de color indica el UR por categoría de uso (izquierda), UR por especie (centro) y UR por informante (derecha).

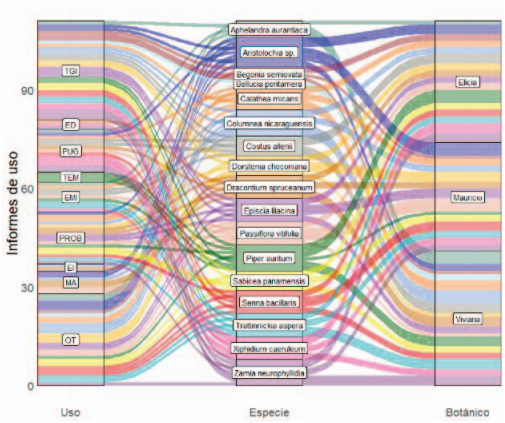


Figura 4. Resumen del UR. Se muestran los 111 informes de uso para cada una de las nueve categorías generales de uso medicinal (izquierda) relacionado con cada una de las 17 especies (centro) y cada uno de los tres informantes o expertos (derecha). Las categorías generales de uso medicinal son (de arriba abajo): trastornos gastrointestinales (TGI); enfermedades dermatológicas (ED); problemas urogenitales y ginecológicos (PUG); trastornos esqueleto-musculares (TEM); enfermedades médicas internas (EMI); problemas respiratorios, oído y boca (PROB); enfermedades infantiles (EI); mordida y picadura de animales (MA) y otros trastornos (OT).

Un UR por categoría de uso con una línea más ancha indica un mayor grado de coincidencia entre los informantes para el uso medicinal de esa especie; y una línea angosta, indica menor coincidencia. Un UR por informante con una línea más ancha indica que el botánico usa esa especie de planta en diversas categorías de uso; y más angosta, en un menor número de categorías de uso.

IV. Discusión

En lo que respecta al trabajo de reconocimiento taxonómico, solo una de las 17 plantas que se usó en las entrevistas no se identificó hasta especie, *Aristolochia* sp.; no obstante, en los recorridos encontramos especímenes fértiles de *Aristolochia pilosa* y *Aristolochia inflata*.

Los nombres comunes escritos en ngäbere son resultado de la interpretación fonética que el redactor hace a lo comunicado por el informante. Estos nombres comunes en ngäbere no han sido comparados o unificados; no obstante, si solamente aparece un nombre es porque este resultó consistente entre los informantes.

Para este estudio preliminar se incluyó un número minúsculo de plantas nativas que se usan en la medicina tradicional Ngäbe. Generalmente, los estudios etnobotánicos listan un gran número de plantas porque abarcan todo tipo de relación con las plantas. El número de plantas citadas disminuye cuando el estudio se hace específico para alguna categoría de uso. Un ejemplo, es el estudio de 17 plantas en el tratamiento tradicional de la diarrea y otras enfermedades en el sur de Benín, África [13].

Los resultados del índice UR indican que muchas de las especies de plantas se usan en diversas categorías de uso medicinal; en otras palabras, los UR de las plantas no fueron específicos para una sola categoría, lo que significa que una misma planta se usa para diferentes propósitos. Esto puede deberse a la forma en que los botánicos preparan los remedios. Ellos coincidieron en que sus remedios se preparan de la combinación de 3 o más plantas.

Los informantes coincidieron en el uso de *Begonia semiovata*, *Costus allenii*, *Episcia lilacina* y *Zamia neurophyllidia* para el tratamiento de trastornos gastrointestinales; *Xiphidium caeruleum* para el tratamiento de problemas urogenitales; y de *Piper auritum* para el tratamiento de trastornos esqueleto-musculares.

Resultó interesante, que solo uno de los botánicos informó sobre el uso de remedios para tratar enfermedades infantiles (ej. sialorrea, onfalitis y parotitis). Específicamente, reportó esos usos para: *Columnea nicaraguensis* y *Dracontium spruceanum*. Posiblemente, esto se deba a que el tema de protección y cuidado infantil es más complicado; de darse algún incidente adverso, este podría considerarse negligencia en el cuidado de un menor de edad y acarrear consecuencias legales.

También, se reportó el uso de *Trattinnickia aspera* en la preparación de remedios para el tratamiento de la Covid-19 desde la aparición de la pandemia. En el aroma de la resina de *T. aspera* se han detectado olores similares a trementina, alcanfor y mentol [14].

Otro grupo indígena, los Teribes, usan varias de estas plantas en su medicina tradicional y algunos usos coinciden con los otorgados por los botánicos Ngäbe entrevistados; por ejemplo, *Xiphidium caeruleum* para el tratamiento de problemas de parto, *Piper* para el dolor de cuerpo, *Columnea nicaraguensis* para bajar la fiebre, y *Passiflora*, *Aristolochia* y *Dracontium spruceanum* para la mordedura de ofidios [15]. Así mismo, se mencionan otros usos medicinales distintos para: *Begonia semiovata*, *Zamia*, *Senna*, *Bellucia pentamera* y *Trattinnickia aspera* [15].

Todas las plantas producen compuestos químicos secundarios que son recursos potencialmente útiles para el desarrollo de nuevos medicamentos [16]. Los bosques tropicales poseen alta biodiversidad de plantas y, por ende, una amplia variedad de productos químicos desconocidos. Las plantas en sí mismas son de valioso interés y debe considerarse su preservación para aprovechamientos y beneficios futuros.

Estos reportes y evidencias etnobotánicas servirán para posteriores estudios de identificación de principios activos para medicamentos.

V. Conclusión

La atención de medicina alternativa es parte importante dentro la cultura Ngäbe-Buglé porque está al alcance de todos como un medio de subsistencia; siendo esta, a veces, la única opción existente para las personas más pobres en la comunidad.

Con el índice cuantitativo etnobotánico de Informe de Uso se describió la importancia de 17 especies de plantas empleadas en la medicina tradicional Ngäbe-Buglé. Los datos se apoyaron en la información suministrada por 3 informantes que participaron de los inventarios y las entrevistas.

Los resultados destacan la importancia de las plantas de los bosques locales para las familias en la comunidad de Santa Marta; concretamente, en lo referente al uso curativo de las plantas como medicina alternativa dentro de la cultura Ngäbe-Buglé, aportando este estudio la identificación etnobotánica de las especies junto a la documentación de sus usos medicinales tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean dar las gracias a los botánicos de Santa Marta por compartir sus conocimientos y permitir su difusión en el presente artículo; así como también, a todos los jóvenes que participaron del taller de etnobotánica. Gracias a la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) por su apoyo a través del Sistema Nacional de Investigación (SNI) al investigador JRF.

REFERENCIAS

[1] J. Alonso y C. Desmarchelier, *Plantas medicinales autóctonas de la Argentina: bases científicas para su aplicación en atención primaria de la salud*, 1a ed. Buenos Aires: Corpus Libros Médicos y Científicos, 2015, p. 748.

[2] S. Wolverton, "Ethnobiology 5: Interdisciplinarity in an era of rapid environmental change," *Ethnobiology Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 21–25, 2013.

[3] N. L. Torres, A. Zapata, M. Torres, A. Santana, B. Morales y J. L. Martinez, "Diversidad y usos de las plantas medicinales en Panamá," *Bol Latinoam Caribe Plant Med Aromat*, vol. 18, no. 4, pp. 425–434, 2019.

[4] U. P. Albuquerque, J. Silva Soares, J. Loureiro Almeidas Campos, R. Silva Sousa, T. C. Silva y R. R. Nóbrega Alves, "The current status of ethnobiological research in Latin America: gaps and perspectives," *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, vol. 9, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1186/1746-4269-9-72.

[5] U. P. Albuquerque, M. Alves Ramos, W. J. Soares Ferreira y P. Muniz de Medeiros, Ethnobotany for beginners. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, p. 71.

[6] V. Caballero-Serrano *et al.*, "Traditional ecological knowledge and medicinal plant diversity in Ecuadorian Amazon home gardens," *Global Ecology and Conservation*, vol. 17, pp. 1–23, 2019, doi: 10.1016/j.gecco.2019.e00524.

[7] K. Aiona *et al.*, "Ethnobotany, the science of survival: a declaration from Kaua'i," *Economic Botany*, vol. 61, no. 1, pp. 1–2, 2007, doi: 10.1007/bf02862367.

[8] MEF, "Índice de pobreza multidimensional de Panamá: Año 2017," Ministerio de Economía y Finanzas, Panamá, Panamá, Informe Técnico, 2017.

[9] U. P. Albuquerque, R. F. P. Lucena, J. M. Monteiro, A. T. N. Florentino y C. de F. C. B. R. Almeida, "Evaluating two quantitative ethnobotanical techniques," *Ethnobotany Research and Applications*, vol. 4, pp. 51–60, 2006.

[10] C. Whitney, *ethnobotanyR: Calculate quantitative ethnobotany indices*. 2021.

[11] R Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

[12] RStudio Team, *RStudio: Integrated development environment for R*. Boston, MA: RStudio, PBC, 2021.

[13] V. Dougnon *et al.*, "An ethnobotanical survey of seventeen plants species used against diarrhoea and other diseases in southern Benin (West Africa)," *Journal of Biological Research-Bollettino della Società Italiana di Biologia Sperimentale*, vol. 94, no. 1, 2021.

[14] M. E. Gompper y A. M. Hoylman, "Grooming with trattinnickia resin: Possible pharmaceutical plant use by coatis in panama," *Journal of Tropical Ecology*, vol. 9, no. 4, pp. 533–540, 1993, doi: 10.1017/S0266467400007616.

[15] M. P. Gupta *et al.*, "Medical Ethnobotany of the Teribes of Bocas del Toro, Panama," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 96, no. 3, pp. 389–401, 2005, doi: 10.1016/j.jep.2004.08.032.

[16] M. J. Balick y R. Mendelsohn, "Assessing the economic value of traditional medicines from tropical rain forests," *Conservation Biology*, vol. 6, no. 1, pp. 128–130, 1992.

Human resources in the food agroindustry in Panama

El recurso humano en la agroindustria alimentaria en Panamá

Wedleys Tejedor-Espinosa
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
wedleys.tejedor@utp.ac.pa

Yamileth Pittí-Pinzón
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
yamileth.pitti@utp.ac.pa

Victor Guillén-Pérez
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
victor.guillen@utp.ac.pa

Bolívar Bernal-Mójica
Centro Regional de Azuero
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
bolivar.bernal1@utp.ac.pa

Celinda Pérez-De León
Centro Regional de Azuero
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
celinda.perez@utp.ac.pa

Ricardo Caballero-González
Centro Regional de Azuero
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
ricardo.caballero@utp.ac.pa

***Abstract*—The workforce is of vital importance for the success of any company in any economic sector. This paper analyzes how the workforce is perceived by entrepreneurs in the food agroindustry in Panama, as well as how women participate in said activity. A survey was applied, at the national level, to 348 companies classified per size as micro, small, or medium. Although, the instrument for collecting the information included other aspects, for the purposes of this work, only the data related to the workforce that labor in the companies surveyed were considered.**

The results indicate that, in Panama, there is an increasing number of businessmen who consider labor as one of the main problems of their company and there is an increasing number of women who work and own their companies. The areas where women mostly work are administration and sales. Even though, there are still differences between the number of men and women who work permanently and temporarily.

Keywords - Food agroindustry, human resources, workforce.

Resumen – El recurso humano es de vital importancia para el éxito de cualquier empresa en cualquier sector económico. En este trabajo se analiza cómo es percibido el problema de la mano de obra por los empresarios de la agroindustria alimentaria en Panamá, así como también, cómo es la participación de las mujeres en dicha actividad. Se aplicó una encuesta, a nivel nacional, a 348 empresas consideradas como micro, pequeñas o medianas. Aunque el instrumento de recolección de la información aplicado incluía otros aspectos, para efectos de este trabajo se consideraron sólo los datos relacionados con el recurso humano que labora en las empresas encuestadas.

Los resultados indican que, en Panamá, cada vez es mayor el número de empresarios que consideran la mano de obra como uno de los principales problemas de su empresa y que cada vez es mayor el número de mujeres que trabajan y son dueñas de sus empresas. Las áreas donde mayormente se desenvuelven las mujeres son las de administración y ventas. Aunque todavía existen diferencias entre la cantidad de hombres y mujeres que trabajan de manera permanente y temporal.

Palabras claves: *agroindustria alimentaria, recurso humano, mano de obra.*

1. INTRODUCCIÓN

Para que una empresa sea efectiva y exitosa, requiere tener un capital humano preparado para ejercer sus funciones adecuadamente y su esfuerzo haga la mejor contribución al logro de los objetivos de la empresa, a su vez, le facilite su autorrealización como persona. Para ello, no solo se debe contar con un perfil bien definido del cargo a ocupar por el recurso humano requerido, sino conocer y tener bien claros cada uno de los procesos que van desde el reclutamiento y selección, retención de los mejores colaboradores, las políticas o lineamientos establecidos de remuneración y retribución, así como, de los planes de capacitación que generen un personal competitivo para un mejor desempeño en las actividades que se le asignen.

De acuerdo con [1], la fuerza laboral cambiará de forma drástica en los próximos dos años; si bien esta publicación hacía referencia principal a los cambios que se darían debido al incremento del "trabajo a distancia", producto de la pandemia por Covid 19, no es menos cierto que muchos de ellos están relacionados con la fuerza laboral, lo que ha obligado a los empresarios a revisar sus esquemas en materia de recursos humanos.

Si hablamos de sectores específicos como es el caso de las empresas agropecuarias y agroindustriales, la mano de obra

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00067

juega un papel fundamental debido a los conocimientos específicos que deben tenerse en cuanto a la producción y elaboración de los productos, sin embargo, en muchos lugares, estos requerimientos contrastan con los niveles de educación que actualmente presentan las personas que laboran en estos sectores [2]. En [3] se analiza el manejo deficiente que dan las empresas agropecuarias argentinas a la gestión del recurso humano y las consecuencias que esto tiene en materia de productividad y competitividad.

Específicamente en las agroindustrias alimentarias, el recurso humano juega un papel preponderante a la hora de implantar sistemas de calidad e inocuidad [4]. En este sentido, estos autores encontraron que los problemas que enfrentan las pequeñas y medianas empresas (PYME´s) agroindustriales alimentarias en Panamá, se relacionan principalmente con la falta de mano de obra para ejercer las funciones propias de la actividad que desarrollan, así como el temor de contratarlo y no se logre un desempeño productivo, la ausencia de compromiso del personal contratado y la falta de capacitaciones que aseguren que ese personal se desempeñe bajo las mejores prácticas. Para que sea más fácil la introducción de una cultura de calidad en las empresas, [5] sugiere una forma de entrenamiento para el personal de tipo lúdico, de tal manera que se logre una mejor comprensión y aplicación de los conceptos relacionados con la inocuidad alimentaria.

Una situación que viene dándose desde hace más de dos décadas es la constante inserción de las mujeres al mercado laboral, esto, de acuerdo con [6] ha incrementado la demanda de materias primas de alto valor, de alimentos procesados y alimentos preparados listos para consumir. En Panamá, no sólo es mayor el número de mujeres que ingresan al mercado laboral, sino que de acuerdo con [7], el 36.2% de las empresas consideradas como micro, pequeñas y medianas (MIPYMES) están siendo gestionadas por mujeres.

El Centro Nacional de Competitividad de Panamá en su Infográfico CNC No.87 con datos a octubre de 2021, relacionado con las diferencias de género en Panamá, señala que: el nivel de instrucción universitaria de las mujeres y hombres es de 55% y 45%, respectivamente; que el promedio de años aprobados por las mujeres es de 12.5 años, mientras que el de los hombres es de 11.2 años, que en cuanto a directores y gerentes de empresas en general, el 46.1% son mujeres y el 53.9% son hombres, esto a pesar de que el 57.9% del personal considerado como profesionales, científicos e intelectuales son mujeres [8].

No cabe duda de que la pandemia por Covid 19 tuvo un impacto negativo muy fuerte en el tejido empresarial a nivel mundial y Panamá no fue la excepción; específicamente, en lo relacionado al empleo, en donde el 67.1% de las empresas, en el año 2021, pensaban que el empleo iba a disminuir [7]. De hecho, [9] señalan como una desventaja para las empresas panameñas, tener que cambiar sus procesos debido a la pandemia, esto como resultado de la pérdida de empleos por despido de muchas personas de sus plazas de trabajo.

Lo anterior evidencia que, en Panamá, en términos generales, la participación de la mujer en el mercado laboral es cada vez mayor, tanto en el número de mujeres que trabaja, como en el número de ellas que ocupan cargos directivos y de gerencia. En este trabajo se analiza cómo los empresarios de la agroindustria alimentaria en Panamá perciben el problema de la mano de obra y, además, cómo es la participación de las mujeres en dicha actividad.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada consistió en tomar como referencia los datos generales de las empresas en la República de Panamá reportadas en los registros de la Contraloría General de la República (CGR) del año 2018, así como aquellas contenidas en el Directorio de Empresas Agroindustriales 2016 de la Dirección de Agroindustrias (DAI) del Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA). La base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) de la CGR agrupa agroindustrias formales mientras que el listado del MIDA incluye las micro y pequeñas empresas, algunas con el estatus de informales. Con estas dos fuentes, se elaboró una base de datos mixta estimándose la población de las agroindustrias alimentarias en 2806 empresas a nivel nacional. Se clasificaron las empresas en ramas o actividades agroindustriales según la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU) de las Naciones Unidas.

Para la determinación del tamaño de muestra se utilizó un diseño estratificado aleatorio para una población conocida, teniendo como estratos las provincias y las ramas agroindustriales, siguiendo el método de afijación proporcional y un nivel de confianza del 95%. Con la fórmula empleada se obtuvo un tamaño de muestra mínima de 338 encuestas. Sin embargo, se aplicaron 348 encuestas en 10 provincias. En la Tabla 1 se muestra el número de empresas aplicadas por provincia. Como instrumento para la recopilación de la información se utilizó un formulario encuesta, el cual iba acompañado de su respectivo instructivo para los encuestadores. Respecto a la creación y codificación de las variables a partir de la encuesta, se utilizó un formulario de Google Forms. Las encuestas se aplicaron, cara a cara, a dueños y/o gerentes de las empresas, en un periodo comprendido entre el 23 de mayo y 19 de agosto de 2021.

TABLA 1. NÚMERO DE ENCUESTAS APLICADAS POR PROVINCIA.

Provincia	No. de empresas AIA	Muestra según fórmula	Número de encuestas aplicadas
Bocas del Toro	45	5	5
Chiriquí	740	89	99
Coclé	223	27	33
Colón	66	8	7
C. Guna Yala	83	10	0
Darién	27	3	4
Herrera	387	47	55
Los Santos	220	27	32
Panamá	611	73	54
Panamá Oeste	204	25	30
Veraguas	200	24	29
TOTAL	**2,806**	**338**	**348**

Aunque el instrumento de recolección de la información aplicado incluía otros aspectos [10], para efectos de este trabajo se consideraron sólo los datos relacionados con el recurso humano que labora en las empresas encuestadas. Los datos del presente estudio también se han comparado con los datos de los estudios [11], [12] y [13].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los problemas que dicen confrontar los agroindustriales, se observa en la Fig. 1 que la mano de obra estuvo en la posición sexta, siendo mencionado por un 25% de los encuestados. Haciendo un análisis en el tiempo, en la Tabla 2 se observa que, en los dos últimos estudios, la mano de obra ha sido mencionada por el 37% y el 25%, en los diagnósticos de los años 2013 y 2021, respectivamente. En el año 1993 no fue revelado como un problema y en el año 2002 sólo fue mencionado por el 7.5% de los encuestados. A pesar de que, en el estudio realizado no se profundizó sobre cuáles son los problemas específicos a los que se refieren los empresarios agroindustriales en relación con la mano de obra, muchos de ellos comentaron que no sólo es que no se encuentran personas para trabajar, sino que, además, la actitud de las personas hacia el trabajo y la capacitación son elementos muy importantes para lograr el mejor de los resultados, lo que está de acuerdo con lo señalado por [4].

De acuerdo con los resultados obtenidos, y tal como se muestra en la Fig. 2, en la agroindustria alimentaria panameña, el 62% de los trabajadores son hombres y el 38% mujeres. Al comparar estos datos con los obtenidos en los diagnósticos de agroindustria rural en Panamá en los años 1993 y 2002 y con los de la agroindustria alimentaria en Panamá para el año 2013, se observa que la proporción de mujeres que trabaja en la agroindustria en Panamá ha tenido una tendencia creciente (un aumento de 14 puntos porcentuales), lo que representa un crecimiento de 58.3% si se comparan los datos del año 2021 en relación con los del año 1993 (Fig. 3).

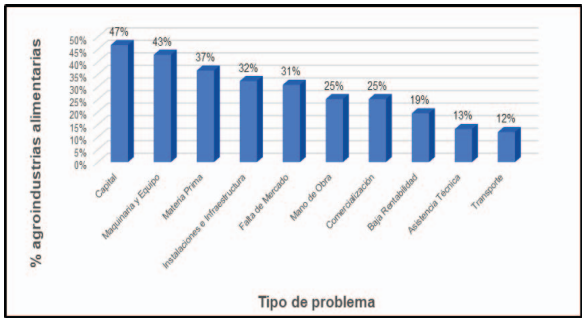


Fig. 1. Problemas mencionados por los agroindustriales en Panamá - 2021.

TABLA 2. PORCENTAJE DE EMPRESAS QUE MENCIONÓ LA MANO DE OBRA COMO PROBLEMA.

Año	Empresas (%)	Posición
2002	7.5	10
2013	37	5
2021	25	6

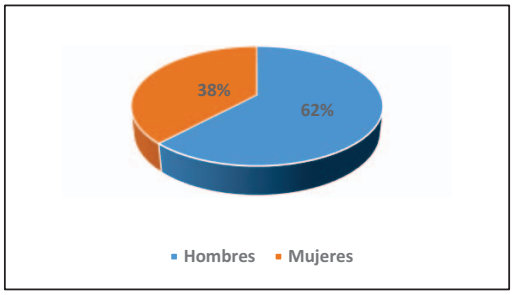


Fig. 2. Porcentaje de hombres y mujeres en la agroindustria alimentaria en Panamá – 2021.

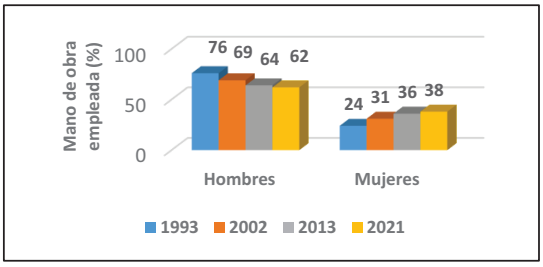


Fig. 3. Porcentaje de mano de obra empleada en la agroindustria en panamá, según género.

Otro resultado interesante es el que se muestra en la Fig. 4, donde el porcentaje de mujeres que son dueñas de sus empresas pasó de 36% en el año 2013 a 43% en el año 2021, lo que representa un crecimiento de casi un 20% para dicho periodo. También se observó que la proporción de mujeres

que son dueñas de sus empresas disminuye conforme aumenta el tamaño de la misma, es decir que proporcionalmente hay más mujeres dueñas de microempresas que de empresas medianas (Fig. 5). Lo mismo sucede con la proporción de mujeres que son dueñas de empresas con respecto a la antigüedad, es decir, que la proporción de mujeres que son dueñas de empresas consideradas jóvenes o menores de 5 años, es mayor que cuando las empresas son consolidadas o con más de 20 años (Fig. 6).

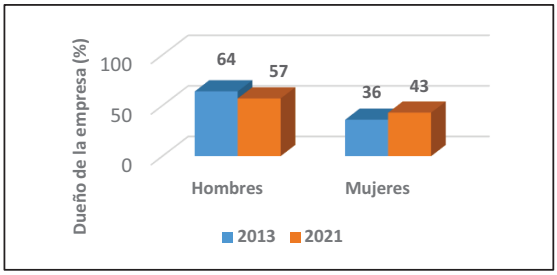


Fig. 4. Porcentaje de dueños de empresas en la agroindustria en Panamá, según género.

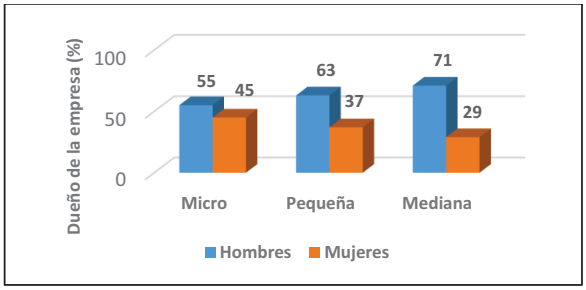


Fig. 5. Porcentaje de dueños de empresas en la agroindustria en Panamá, según género y tamaño de la empresa.

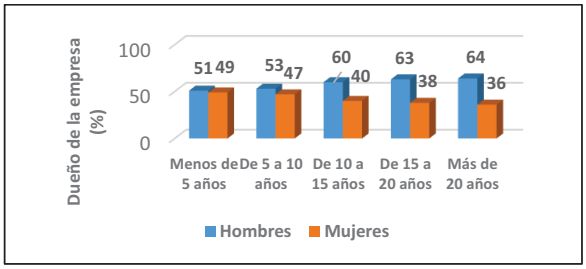


Fig. 6. Porcentaje de dueños de empresas en la agroindustria en Panamá, según género y antigüedad de la empresa.

En relación con las áreas de trabajo dentro de las empresas donde se desempeñan hombres y mujeres, en la Tabla 3 se observa que, en términos generales, en la agroindustria panameña la mayor concentración de mano de obra está en el área de producción y un 80% es del género masculino; la mano de obra femenina se encuentra repartida en las diferentes áreas de trabajo, siendo mayor su participación en labores de ventas con un 27% y administrativas, con un 18%. Estos resultados coinciden con los presentados [8] donde se manifiesta que, en los empleos de oficina, de servicios y comerciales, la proporción de mujeres es del 59.2% en tanto que la de hombres es de 40.8%.

TABLA 3. DISTRIBUCIÓN DEL PERSONAL, SEGÚN GÉNERO Y ÁREA DE TRABAJO (%).

Género	Área de trabajo (%)		
	Administración	Producción	Ventas
Mujeres	18	55	27
Hombres	9	80	11

TABLA 4. PROMEDIO DE COLABORADORES SEGÚN CONDICIÓN LABORAL Y GÉNERO.

Condición laboral	Género		P-valor	Sig.
	Femenino	Masculino		
Permanente	2.52	3.62	0.0194	**
Temporal	1.05	2.41	0.0067	***
Nota: N.S. = no significativa, (*) = p<0.10, (**) = p<0.05, (***) = p<0.01				

En relación con la condición laboral y género, los resultados indican que el 73% de la mano de obra de la agroindustria alimentaria en Panamá trabaja de forma permanente, sin embargo, el 33% de las empresas dijeron que tuvieron que hacer reducción de personal durante la pandemia por Covid 19. Por otro lado, En la Tabla 4 se indica que, en las empresas consideradas como MIPYMES agroindustriales alimentarias en Panamá, un promedio de 3.62 hombres y 2.52 mujeres, laboran de forma permanente. Al hacer un análisis de varianza de estos datos, se tiene que sí existen diferencias significativas al 95% de confianza entre el promedio de hombres y mujeres que laboran de forma permanente. Con respecto a los trabajos temporales, se tiene que en promedio hay 2.41 hombres y 1.05 mujeres en esta condición y que también existen diferencias significativas entre estos datos, incluso al 99% de confianza.

En las Tablas 5, 6 y 7 se observa que, aunque a nivel general hayan diferencias significativas entre hombres y mujeres en cuanto a su condición laboral (permanente y temporal), esta situación no es la misma si la comparación se hace en cuanto al tamaño de las empresas, observándose que incluso esas diferencias no existen para el grupo de las empresas consideradas como medianas, aun cuando para este grupo se encuentran en promedio, 16.47 hombres y 9.65 mujeres trabajando de forma permanente y de forma temporal, 7.29 hombres y 3.77 mujeres, respectivamente.

TABLA 5. PROMEDIO DE COLABORADORES SEGÚN CONDICIÓN LABORAL Y GÉNERO (MICRO EMPRESAS)

Condición laboral	Género		P-valor	Sig.
	Femenino	Masculino		
Permanente	1.71	1.96	0.1355	N.S.
Temporal	0.62	1.44	0.0001	***
Nota: N.S. = no significativa, (*) = p<0.10, (**) = p<0.05, (***) = p<0.01				

TABLA 6. PROMEDIO DE COLABORADORES SEGÚN CONDICIÓN LABORAL Y GÉNERO (EMPRESAS PEQUEÑAS)

Condición laboral	Género		P-valor	Sig.
	Femenino	Masculino		
Permanente	3.44	5.18	0.0087	***
Temporal	1.70	4.29	0.1910	N.S.
Nota: N.S. = no significativa, (*) = p<0.10, (**) = p<0.05, (***) = p<0.01				

TABLA 7. PROMEDIO DE COLABORADORES SEGÚN CONDICIÓN LABORAL Y GÉNERO (EMPRESAS MEDIANAS)

Condición laboral	Género		P-valor	Sig.
	Femenino	Masculino		
Permanente	9.65	16.47	0.2322	N.S.
Temporal	3.77	7.29	0.3360	N.S.
Nota: N.S. = no significativa, (*) = p<0.10, (**) = p<0.05, (***) = p<0.01				

De acuerdo con los resultados de este estudio, en Panamá el 41% de las agroindustrias alimentarias no cuentan con el Registro Único de Contribuyentes (RUC), que es la identificación tributaria de toda persona natural o jurídica que realiza una actividad económica y que es asignado por la Dirección General de Ingreso (DGI). No obstante, en la Fig. 7 se observa que la proporción de empresas que cuentan con RUC es mayor cuando el dueño de la empresa es mujer (64%) que cuando es hombre (56%), lo que indica que las mujeres se preocupan más por que la empresa tenga un carácter formal.

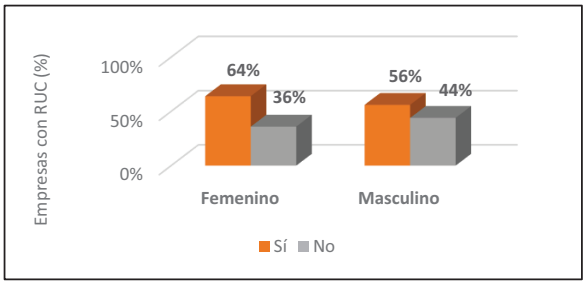


Figura 7. Porcentaje de empresas de la agroindustria alimentaria en Panamá que cuentan con Registro Único del Contribuyente (RUC), según género del dueño de la empresa.

De acuerdo con los encuestados, los efectos negativos de la pandemia por Covid 19 más relacionados con el personal que labora en la agroindustria alimentaria, además de la reducción de personal digamos que, obligado y el cierre de algunos locales, destacan la reducción del número de horas trabajadas y el aumento de costos por alquiler de transporte para el personal. Por otra parte, algunas empresas dijeron que aprovecharon el tiempo de pandemia para dar capacitación al personal en algunos temas importantes para incrementar la productividad de la empresa.

4. CONCLUSIONES

En la última década, la mano de obra (recurso humano) en las empresas agroindustriales alimentarias en Panamá empieza a ser reconocido como uno de los principales problemas que afecta a dicha actividad económica.

En Panamá, la participación de la mujer en actividades agroindustriales ha venido incrementándose de manera sostenida en los últimos 30 años; incluso como dueñas de empresas en este importante sector de la economía, su incremento también ha sido notorio, aun cuando todavía existen diferencias en la condición laboral entre los géneros masculino y femenino. Las áreas de trabajo de la empresa donde se desempeñan en mayor proporción las mujeres son en la parte administrativa y de ventas; contrario a los hombres cuya participación se concentra en las áreas de proceso. Estos datos revelan que, en el periodo de estudio, una importante incorporación de la fuerza laboral femenina se ha generado en la última década, inclusive en actividades no tradicionales en comparación con los estudios anteriores, sin embargo, aun así, persiste una línea digamos que discriminatoria en cuanto a los roles que se asignan a ambos géneros.

El estudio constituye una buena base para orientar los esfuerzos a la creación de políticas y acciones tendientes a mejorar el desempeño de la mano de obra empleada en empresas del sector agroindustrial alimentario en Panamá, que les permita crear un valor agregado a sus productos y mejorar su desempeño para lograr una mayor participación en el mercado en el que tienen presencia y la oportunidad de reorientar sus prácticas y recursos para ser más competitivas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las gestiones realizadas por el Ministerio de Comercio e Industrias (MICI) de Panamá para la realización de este proyecto, así como también a la Corporación Andina de Fomento (CAF) por haber aportado los recursos para su realización. Al Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT-AIP) por el aporte brindado en materia administrativa.

6. REFERENCIAS

[1] KPMG International. (2020). The future of HR in the new reality. It's time to start playing the long game.

[2] Santa-María Alejandro, Rojas Patricio, Melin Patricio y Fawaz Julia (2018). Formación de recursos humanos en el

sector agropecuario y agroindustrial a través de la articulación de educación superior, media, no formal y sector productive. Revista Calidad de la Educación, pp. 215-222. DOI-10.31619/caledu.n23.297

[3] Fajardo, F.A. (2015). Gestión de recursos humanos en empresas agropecuarias [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina.

[4] Cortés, D.; Ramos Chue de Pérez, J. y Tejedor W. (2020). Impacto del recurso humano al implantar un sistema de gestión de inocuidad alimentaria en pequeñas y medianas empresas en Panamá. *Revista Prisma Tecnológico*, 11(1), 23-30. https://doi.org/10.33412/pri.v11.1.2531

[5] Cortés, D. (2019). Estudio de caso: Diseño de un programa de entrenamiento en cultura de inocuidad en una agroindustria panameña. *Revista Plus Economía*, Vol. 7, Núm. 2. pp. 19-27.

[6] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). Agroindustrias para el Desarrollo. Roma.

[7] Piper R.; Tam N.; Durán R.; Sanfilipo, E.; Martez, N.; González, E. y Bernal B. (2021). Impacto económico de la crisis Covid-19 sobre la MIPYME en Panamá.

[8] Centro Nacional de Competitividad – Panamá. (2021). Infográfico CNC No.87.

[9] Bocaranda, V.; Ibarra, W. y Álvarez H. (2022). Prácticas adoptadas en Panamá por las cadenas de suministro a causa de la pandemia (Covid-19). *Revista Plus Economía*, Vol. 10, Núm. 1. pp. 86-99.

[10] Pittí, Y.; Guillén, V; Tejedor, W.; Pérez, C.; Caballero, R. y Bernal B. (2021). Actualización del Estudio de Caracterización de Empresas Agroindustriales Alimentarias de Panamá – 2021.

[11] Diagnóstico de la Agroindustria Rural en Panamá - 1993.

[12] Fundación Tecnológica de Panamá. (2002). Diagnóstico sobre la Agroindustria Rural en Panamá - 2002.

[13] Pittí, Y; Guillén, V. y Tejedor, W. (2013). Caracterización de Empresas Agroindustriales Alimentarias de Panamá – 2013.

Design and construction of a multiparameter instrument prototype for continuous remote monitoring of physical variables

Diseño y construcción de un prototipo de instrumento multiparámetro para el monitoreo continuo a distancia de variables físicas.

Sorhay Vasquez[1], Manuel Batista[1], Luys Santana[2], Bernardo Guerrero[3], Roberto Morales[4], Javier Sánchez Galán[5,6], Ericka Matus[1,6], Jay Molino[1,6]
[1]Facultad de Biociencias y Salud Pública, Universidad Especializada de las Américas, Paseo de la Iguana, Albrook, Ciudad de Panamá, República de Panamá
[2]Nubelab Technologies, S.A., Calle 53 y Avenida Balboa, Ciudad de Panamá, República de Panamá.
[3]Departamento de Investigación del Ministerio de Salud, Universidad de Panamá, El Cangrejo, Vía Simón Bolívar, Ciudad de Panamá, República de Panamá.
[4]Departamento de Ingeniería y Ciencias Computacionales, University of London, Stewart House, 32 Russell Square, London WC1B 5DN, United Kingdom.
[5]Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Panama
[5]Sistema Nacional de Investigación (SNI), SENACYT, Panamá

***Abstract*—The design, construction, and validation of a portable multiparameter instrument prototype is reported, which measures the pH of liquids, the concentration of CO2 in the environment, temperature, and environmental humidity with access to Wi-Fi for continuous monitoring in spaces. The sampled data were compared with readings from commercial instruments (pH meter, CO2 meter "HOBO MX1102, L21I-D04508", thermometer for medical purposes), registering an absolute error of 0.20 for the pH meter, for the CO2 reading of +/- 40ppm, and ambient temperature of 0.23 respectively. The prototype requires 15±3.35 seconds to present all the monitored signals. The results show that the developed prototype can be used for monitoring purposes, such as teaching laboratories, research laboratories, and facilities requiring continuous monitoring, such as hospitals or public places where the accumulation of CO2 is essential for health.**

Keywords— Multiparameter meter, signal processing, ambient quality monitor, IoT.

***Resumen* — Se reporta el diseño, construcción y validación de prototipo instrumento multiparámetro portátil, que mide pH de líquidos, la concentración de CO2 en el ambiente, temperatura y humedad ambiental con acceso a wifi para el monitoreo continuo. Los datos muestreados fueron comparados con lecturas de instrumentos comerciales (medidor de CO2 "HOBO MX1102, L21I-D04508", medidor de pH-termómetro "HANNA instrumentos HI 8314"), registrando para el pH un error absoluto de +/-0.20, para la lectura de CO2 de +/- 40ppm y para la temperatura ambiental de +/-0.23 respectivamente. El prototipo requiere de 15±3.35 segundos para presentar todas las señales detectadas. Los resultados demuestran que el prototipo desarrollado puede ser utilizado para fines de vigilancia, ya sea en laboratorios de enseñanza, laboratorios de investigación, hospitales es decir todos aquellos recintos en las cuales las variables en estudio sean de interés.**

Palabras claves —medidor multiparámetro, procesamiento de señales, monitor de calidad ambiental, IoT.

I. INTRODUCTION

Hoy día existe el interés en desarrollar soluciones que permitan el control de variables relacionadas con la vida cotidiana. Por ejemplo, la contaminación del aire es sin duda alguna, uno de los grandes desafíos ambientales en la salud pública, especialmente en los países más desarrollados. Actualmente hay países, principalmente en las grandes ciudades, donde se toman medidas a partir del monitoreo de variables como: monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno; con el objetivo de darle seguimiento a variables perjudiciales para la salud. Las fuentes documentales reportan el diseño de un prototipo para el monitoreo a distancia de variables relacionadas con la calidad del aire, en donde se implementó el desarrollo de una aplicación IoT, tarjetas electrónicas, uso de sensores para la captación de datos y acondicionamiento de señales para su posterior almacenamiento y visualización [1], [2].

Otro prototipo notable, es el monitoreo automatizado de los parámetros de calidad del agua: pH, temperatura y conductividad [3] donde se presentó resultados interesantes, se utilizaron electrodos de pH, y sensores de temperatura [4].

El uso de la gran cantidad de sensores desarrollados por diversos fabricantes ha aportado de manera efectiva al desarrollo de grandes aplicaciones especialmente en el seguimiento de variables de importancia para la preservación de la salud [4] - [6].

Con la aparición del COVID 19 y las afectaciones que produjo, este tipo de tecnologías se han vuelto necesarias debido a las exigencias en los niveles de prevención; se hizo necesario el distanciamiento y por ende la dificultad de realizar actividades en lugares de enseñanza "laboratorios de química, biología, etc.", provocando un retroceso en la educación; incluso las instalaciones de salud se vieron afectadas por la falta de control. Una de las variables que relaciona el SARS-CoV-2 y los instrumentos de medición es la concentración de CO_2, el cual es uno de los indicadores de probabilidad de contagio a través de la respiración, considerando que los niveles de dióxido de carbono están relacionados con la calidad del aire. [21][15].

En el presente trabajo, se diseñó un prototipo de instrumento multiparámetro, capaz de medir la temperatura, humedad ambiental, concentración de CO_2, pH y temperatura en líquidos, el instrumento diseñado involucra el uso de sensores para las medidas de las variables, teniendo la bondad de enviar los datos de las lecturas a través de WiFi; por tanto es útil especialmente para aplicaciones relacionadas con el control de ambientes (medición de fuga de CO_2, en cámaras de control y crecimiento de cultivos celulares, medición de ambientes en almacenamiento de medicamentos, en centros de enseñanza [5]–[7]. El objetivo del instrumento es ser una herramienta capaz de recolectar de datos y compartirlos en tiempo real, para el control en espacios que lo requieran [8]–[10].

II. METODOLOGÍA

El instrumento desarrollado posee una serie de sensores algunos con señales digitales y otros con señales analógicas de salida; se utilizó el software EasyEda para el desarrollo de las tarjetas electrónicas y para la estructura física se utilizó

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00068

impresoras 3D, y la programación del microcontrolador se realizó en la plataforma IDE Arduino.

Entre los materiales empleados se destaca el microcontrolador "ATMEGA 328P-AU", de 8bits, con bajo consumo y alto rendimiento, lo cual es apto para la aplicación desarrollada [16]. Se empleo para la medición de la concentración de CO_2 el sensor MH-Z14A, de la marca WINSEN, tipo infrarrojo, de alta sensibilidad, con un rango de lectura de 0ppm a 10000ppm y una exactitud de +/-50ppm, aplicable en la medición de calidad de aire en interiores [11]-[17]. Para la medición de la temperatura y humedad relativa ambiental, se utilizó el módulo DTH22 "AOSONG", comúnmente usado en aplicaciones de monitoreo, con una exactitud del +/-5% para la humedad y +/-2°C para temperatura. Para la medición de temperatura de líquido se utilizó el sensor DS18B20 con un rango de medición entre –55°C a +125°C, el cual cuenta con una resolución programable de 9 a 12 bits. Para la medición del pH se implemento el circuito del módulo pH4502C, cuenta con una sensibilidad de aproximadamente 0.002 pH y un rango de medición de 0-14 Ph [14]-[18] [20].

Para la trasmisión de los datos se empleó el módulo ESP8266 "ESP-01WiFi" de bajo costo con capacidad de 2.4 GHz y compatibilidad con WPA/WPA2, fácil de utilizar y con un consumo eléctrico bajo. Para la alimentación de los circuitos diseñados se empleó una batería de litio recargable (HJ 18650 7.4V 3.0Ah), y reguladores de voltaje de 5.0 V y 3.3 V (MCP1703T-5002E/CB, R1191N033B-TR-FE), se utilizaron resistencias de precisión para el ajuste de los sensores y lograr medidas estables. El prototipo diseñado fue comparado con las lecturas de los siguientes instrumentos comerciales: Medidor de pH: Mettler Toledo, GmbH, MP 120, Medidor de pH y temperatura digital HANNA, HI 8314, medidor de concentración de CO_2: HOBO MX1102, L21I-D04508.

A. Arquitectura del sistema

Con el fin de aportar una solución a los problemas propios de la monitorización de variables físicas, vinculando nuevas tecnologías, este trabajo se realizó siguiendo la arquitectura del sistema plasmada en la Figura 1, representada de forma general y la cual consta de una red inalámbrica, que permite trasmitir los datos obtenidos de una serie de sensores a la plataforma thingSpeak (Iot), que visualiza y analiza flujos de datos en la nube [12].

En la figura 2 se muestra un esquema de flujo de señales para la operación del instrumento, la alimentación de los sensores y la tarjeta de procesamiento son proporcionados por una batería, la misma tiene la capacidad de sostener el instrumento trabajando por un periodo máximo de 5 horas continuas, debido al bajo consumo. Los sensores al ser alimentados envían los datos en tiempo real a la tarjeta principal.

El microcontrolador capta las señales, las almacena, comprueba si el dato está dentro de los rangos medibles, hace mediciones repetitivas y posteriormente el algoritmo del programa hace un filtrado, descartando los valores dispersos en las medidas. Luego de las lecturas el microcontrolador se comunica con la tarjeta WiFi – ESP8266, le envía una señal (Comandos AT), indicando que

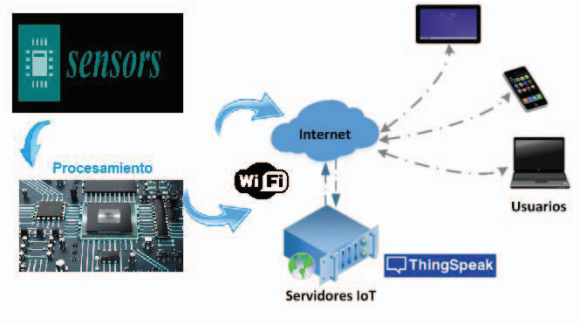


Fig. 1. Algoritmo de diseño del instrumento

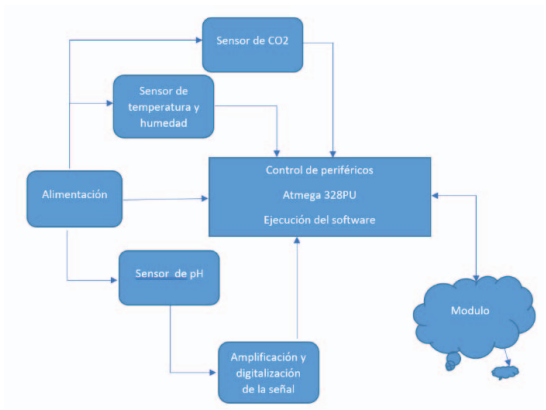


Fig. 2. Flujo de señales en el diseño del instrumento

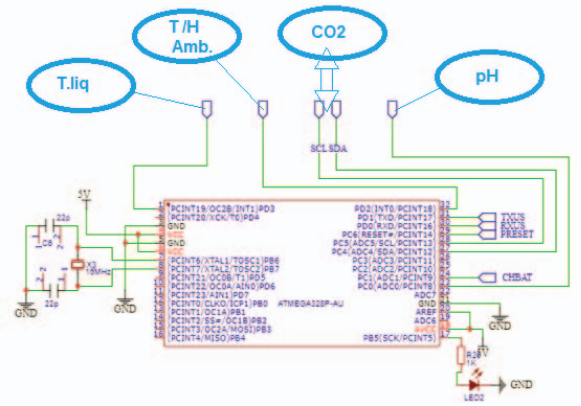


Fig. 3. Microcontrolador ATMEGA328P-AU

hay datos preparados, el módulo WiFi recibe los datos y los envía al servidor de ThingSpeak.

B. Procesamiento

Se ha utilizado el microcontrolador ATMEGA328P-AU, el cual fue programado en entorno de la plataforma IDE Arduino, este microcontrolador es el encargado de adquirir y procesar toda la información obtenida por los sensores y administrar parte de la comunicación, el circuito encargado de llevar a cabo este proceso se presenta esquemáticamente en la figura 3 [19]. en este se muestra el microcontrolador al cual se conectan las salidas de los diversos sensores; aunque para algunos se requiere un circuito adicional.

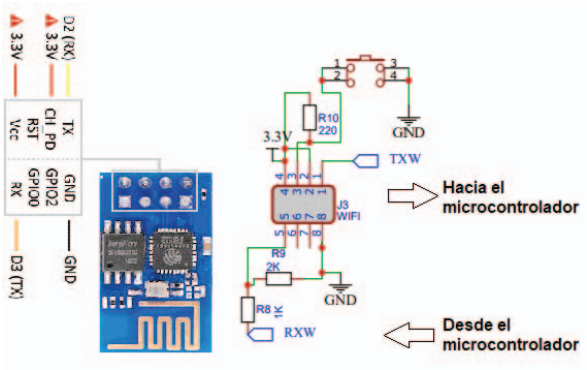


Fig. 4. Módulo de comunicación ESP8266 y circuito implementado.

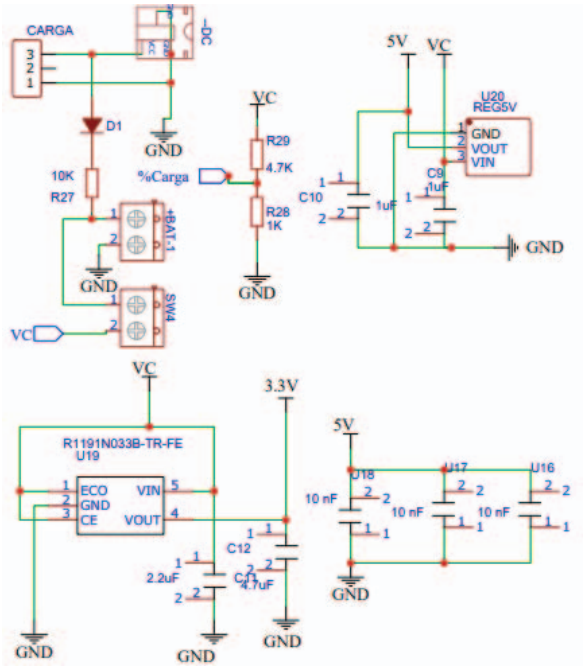


Fig. 5. Componentes del circuito para la alimentación de los diferentes componentes electrónicos.

C. *Módulos de Comunicación*

Se utilizo el módulo adaptador de red WiFi con un radio estándar de 802.11 b/g/n, soporte APSD para aplicaciones VoIP, TCP/IP. Para la transmisión de datos a Internet este módulo viene pre-programado con un conjunto de firmware de comando AT, es decir, sólo se programó para adaptarlo a la aplicación y obtener una aceptable solución IoT (Internet of Things) [13]. El circuito que se utilizó para lograr el funcionamiento lo más estable en cuanto a consumo y eficiencia se muestra en la figura 4.

D. *Abastecimiento de energía*

Para el abastecimiento de energía y alimentación de todos los circuitos implementados incluyendo sensores se empleó una batería de litio recargable (HJ 18650 7.4V 3.0Ah), el prototipo incorpora un circuito de carga de la batería e indicador de porcentaje de carga de la misma. La alimentación de cada uno de los sensores y demás circuitería electrónica se llevó a cabo con reguladores de voltaje tanto de 5.0V y 3.3V, considerando las demandas de corriente de cada sensor o circuito implementado, en la figura 5 se muestran los componentes empleados para el suministro de los voltajes necesarios.

III. RESELTADOS

Una vez desarrollado el prototipo se consideraron una serie de mediciones para diferentes parámetros; en la tabla 1, se presentan las medidas para cada variable con instrumentos de medida comercial y al mismo tiempo se mide con el prototipo diseñado.

En la tabla 2 se muestra un análisis estadístico para comparar las medidas obtenidas entre los instrumentos comerciales de referencia y el prototipo.

De la tabla 2 se observa las estadísticas para cada grupo de medidas, y no existen diferencias estadísticamente significativas entre los promedios de las mediciones realizadas con el prototipo y las realizadas con el instrumento de referencia.

La utilización del sensor de CO_2 (MH-Z14A), arrojo buenos resultados, ya que a diferencia de otros sensores de CO_2, este es tipo NDIR (infrarrojo no dispersivo), no requieren un circuito para el calentamiento constante, el tiempo necesario para mantener lecturas estables es de unos pocos segundos, la hoja técnica especifica que 3 segundos, en nuestro caso la estabilidad se alcanzó alrededor de los 2.8 segundos. Tampoco necesitó de recalibración continua ya que se recalibra automáticamente.

TABLA I. MEDICIÓN DE CADA UNO DE LOS PARÁMETROS

Tiempo de transmision (segundos)	Lecturas de pH		Lecturas de CO2 (ppm)		Lecturas temperatura Ambiental (°C)		Lecturas temperatura liquido al (°C)	
	P	I	P	I	P	I	P	I
16.50	13.40	13.60	460.00	450.00	24.50	25.00	10.10	9.70
17.00	12.38	12.72	464.00	452.00	27.20	27.10	12.90	13.40
16.50	11.28	11.62	492.00	481.00	28.30	28.10	19.80	20.70
15.34	10.19	10.51	693.00	668.00	29.20	29.00	23.60	24.50
14.40	9.66	10.02	730.00	740.00	30.50	30.70	26.00	26.80
15.10	9.08	9.40	769.00	781.00	34.40	34.80	28.90	29.00
16.50	8.77	9.01	836.00	828.00	35.70	36.00	33.80	34.80
16.40	8.12	8.31	989.00	977.00	37.20	37.40	39.70	40.30
16.00	7.22	7.08	997.00	988.00	38.60	38.90	43.90	44.40
16.30	6.62	6.47	1040.00	1038.00	40.30	40.40	55.10	54.70
16.60	6.08	5.95	1225.00	1228.00	50.50	50.40	69.80	70.30
13.10	5.51	5.50	1639.00	1634.00	50.80	51.00	71.80	71.80
19.00	5.12	4.89	1945.00	1957.00	60.00	60.10	72.50	72.80
12.30	4.73	4.67	2368.00	2376.00	65.50	65.30	73.60	73.90
14.00	4.00	3.90	2443.00	2447.00	69.80	70.10	75.00	74.40
15.37	3.86	3.85	2521.00	2512.00	70.30	70.50	76.00	76.30

P: prototipo, I: instrumento de referencia.

TABLA II. PRUEBA DE LEVENE

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de SDev	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Lecturas de pH	varianzas iguales	.137	.714	-.085	30	.932	-.09250	1.082	-2.30363	2.11863
	No varianzas iguales			-.085	29.904	.932	-.09250	1.082	-2.30392	2.11892
Lecturas de CO2 (ppm)	varianzas iguales	.001	.976	.013	30	.990	3.37500	257.165	-521.8277	528.57775
	No varianzas iguales			.013	29.999	.990	3.37500	257.165	-521.8284	528.57849
Lecturas temperatura Ambiental (°C)	varianzas iguales	.000	.991	-.022	30	.982	-.12500	5.564	-11.48836	11.23836
	No varianzas iguales			-.022	30.000	.982	-.12500	5.564	-11.48836	11.23836
Lecturas temperatura liquido al (°C)	varianzas iguales	.005	.946	-.038	30	.970	-.33125	8.619	-17.93460	17.27210
	No varianzas iguales			-.038	29.999	.970	-.33125	8.619	-17.93463	17.27213

Fig. 6. Medición con el prototipo y visualización en tiempo real en diferentes lugares.

En la figura 6 se muestra el prototipo final justamente tomando medidas en tiempo real, puede observarse las medidas tanto en el prototipo como en el celular, el cual a través de la aplicación ThingSpeak, puede mostrar los datos que detecta el prototipo y envía a la nube.

IV. Discusión

El diseñar un instrumento de medida requiere en primer lugar considerar aspectos relacionados con la amplitud de la señal que se desea medir, a partir de esto, se debe considerar si se requiere una amplificación de la variable ya que en la mayoría de veces las señales suelen ser muy pequeñas, otro dato importante es determinar si la señal detectada tiene algún tipo de ruido que afecte la medida, en el trabajo realizado una de las tareas importante fue seleccionar el tipo de sensor a utilizar para la detección de cada variable en estudio, analizar su precisión, exactitud, la linealidad, rango de medida de cada sensor y el comportamiento de estos, fue un factor importante para la obtención de los resultados.

Una vez seleccionado cada sensor y analizado la forma que cada uno de estos permite detectar la señal (analógica o digital) fue importante comprender los protocolos de comunicación principalmente aquellos sensores con salida digitalizada (SPI, I2C, UART), esto permitió de cierta forma decidir que tecnología de procesamiento de la señal se emplearía. Los mecanismos de interpretación de los datos nos llevaron a decidir que microcontrolador utilizar para el manejo de los datos especialmente cuando estos se presentarían en una pantalla o verlos remotamente. Es importante entender que la implementacion de hardware está íntimamente relacionado con el desarrollo de software ya que hoy día la mayoría de los dispositivos electrónicos (sensores, microcontroladores, tarjetas, entre otros.), son programables y todo depende de su entorno de trabajo.

Otro aspecto importante que se tomó en cuenta fue que los dispositivos electrónicos tienen un tiempo de respuesta lo cual para todo diseñador será un factor de mucha ponderación ya que esto tenderá a limitar el desempeño esperado. En todo diseño electrónico es importante la linealidad y la estabilidad de los dispositivos empleados por lo que diseñar un equipo o un instrumento no es tarea fácil y requiere de un trabajo interdisciplinario y de muchas horas de dedicación.

V. Conclusión

El dispositivo fabricado tiene poca variación en las medidas realizadas respecto a los instrumentos ya comerciales y que han sido diseñados para tal fin. Puede observarse en los datos de las medidas recolectadas que el error relativo para las mediciones de pH es de 2% igual que las mediciones de temperatura de líquidos, las lecturas de CO_2 y para la temperatura ambiental el error relativo es del 1% lo cual permite considerar que el prototipo es lineal en comparación al instrumento comercial.

El desarrollo muestra medidas acordes a las presentada por los instrumentos comerciales y al analizar la ficha técnica de cada sensor vemos que los errores están en concordancia con las tolerancias especificadas; por ejemplo el sensor de CO2 (MH-Z14A), sus especificaciones puntualizan una exactitud del +/-50ppm el prototipo desarrollado admite una varianza del +/-40ppm estando esté dato por debajo del máximo permitido, por lo que se puede considerar que el dispositivo presenta muy buena capacidad de respuesta.

El diseñar dispositivos electrónicos es una tarea que demanda esfuerzo y dedicación, especialmente porque cada componente utilizado debe caracterizarse, ya que su funcionamiento depende de las condiciones que se emplee, los niveles de voltaje y corriente establecido por los fabricantes deben respetarse, por ejemplo, existen dispositivos que se alimentan con voltajes menores que otros y su respuesta se vería afectada si los alimentamos con voltajes inadecuados.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería y Ciencias Computacionales de la Universidad de Londres, por la asignación de un colaborador en el proyecto; a la empresa Nubelab Technologies, S.A, por facilitar los espacios y poder realizar pruebas de adquisición de señales y muestreo de las mismas; de igual manera se agradece a las empresas: distribuidoras de equipos médicos (Casa del Médico, ITS), por facilitarnos equipos certificados para realizar la comparación en las medidas.

Referencias

[1] F. R. Valdivia, “Determinación del material particulado, dióxido de azufre y monóxido de carbono en el centro poblado el Arenal – Islay,” 2017. [Online]. Available: http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2432

[2] R. E. Rios Hernández, “Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT,” p. 98, 2020, [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/772

[3] I. H. de Jesús, "Monitoreo Automatizado de los Parámetros de Calidad del Agua pH, Temperatura y Conductividad," Universidad Autónoma Metropolitana, 2018.

[4] M. Stankovic, A. Hasanbeigi, and N. Neftenov, "Uso de tecnologías de la 4RI en agua y saneamiento en América Latina y el Caribe.," *El agua y saneamiento en América Latina y el Caribe*, p. 73, 2020, [Online]. Available: https://siip.produccion.gob.bo/noticias/files/BI_18062020d8691_1curi.pdf%0Ahttps://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Uso-de-tecnologias-de-la-4RI-en-agua-y-saneamiento-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf

[5] J. Baeza R, P. Rojas N, and J. Cordero T, "Utilidad y limitaciones de la medición del CO2 espirado (capnometría) en pacientes pediátricos en ventilación mecánica," *Revista chilena de pediatría*, vol. 64, no. 1, pp. 14–18, 1993, doi: 10.4067/s0370-41061993000100002.

[6] M. A. A. Mamun and M. R. Yuce, "Sensors and Systems for Wearable Environmental Monitoring Toward IoT-Enabled Applications: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 18, pp. 7771–7788, Sep. 2019, doi: 10.1109/jsen.2019.2919352.

[7] A. L. Santos and J. A. Gil, "Gas Y Sensores De Ir Bajo Condiciones De Cielo Abierto Co 2 and Le Fluxes Measured With Interchange Gas," no. 2007, pp. 1–5, 2008.

[8] A. C. Rodríguez Arévalo, A. I. C. Llanos, and J. I. Flores, "Diseño y construcción de los instrumentos de medicón para un biorreactor prototipo," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 24, no. 1, pp. 55–70, 2003.

[9] W. Andrade Gutierrez, "Prototipo De Una Red Sensorial Inalámbrica (Wsn) Para La Medición Del Nivel De Co2 En La Ciudad De Ambato," Univesidad Técnica de Ambato, 2011. [Online]. Available: http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8595/1/Tesis_t953si.pdf

[10] F. Carrasco, "Diseño, Desarrollo E Implementación De Una Solución Basada En Tarjeta Reducida (Arduino) Para La Medición De Co2 Y Material Particulado Dirigido a La Secretaría De La Dirección De Asistencia Técnica Y De Medio Ambiente – Datma Del Municipio De Girardot," Universidad Piloto de Colombia Seccional del Alto Magdalena, 2021.

[11] D. Carolina, C. Moreno, C. Loida, and M. Guerrero, "Análisis comparativo de los niveles de medición de CO2 entre dos medidores con base a los datos tomados en el parqueadero subterráneo del edificio Pinar del Llano Villavicencio-Meta," Nov. 2020. [Online]. Available: http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/4839/1/2020_2_TG_CASTA%c3%91EDA_GUERRERO..pdf

[12] M. Quiñones-Cuenca, V. González-Jaramillo, R. Torres, and M. Jumbo, "Sistema De Monitoreo de Variables Medioambientales Usando Una Red de Sensores Inalámbricos y Plataformas De Internet De Las Cosas," Enfoque UTE, vol. 8, no. 1, pp. 329–343, Feb. 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n1.139.

[13] A. Gaur, B. Scotney, G. Parr, and S. McClean, "Smart City Architecture and its Applications Based on IoT," Procedia Computer Science, vol. 52, pp. 1089–1094, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.122.

[14] I. A. Lakhiar, G. Jianmin, T. N. Syed, F. A. Chandio, N. A. Buttar, and W. A. Qureshi, "Monitoring and Control Systems in Agriculture Using Intelligent Sensor Techniques: A Review of the Aeroponic System," *Journal of Sensors*, 2018. https://www.hindawi.com/journals/js/2018/8672769/

[15] H. McClymont and W. Hu, "Weather Variability and COVID-19 Transmission: A Review of Recent Research," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 2, Jan. 2021, doi: 10.3390/ijerph18020396.

[16] L. A. Méndez-Barroso, J. A. Rivas-Márquez, I. Sosa-Tinoco, and A. Robles-Morúa, "Design and implementation of a low-cost multiparameter probe to evaluate the temporal variations of water quality conditions on an estuarine lagoon system," Environmental Monitoring and Assessment, vol. 192, no. 11, Oct. 2020, doi: 10.1007/s10661-020-08677-5.

[17] J. Morales M., D. Padilla M., D. Parra S., and K. Venenaula O., "Medición de Dióxido de Carbono en ambientes de la Unidad Educativa Técnico Salesiano mediante la internet de las cosas (IoT)," *dspace.ups.edu.ec*, vol. 1, no. 1, Dec. 2018, [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17973

[18] A. Nichani, "Environmental parameter monitoring and Data acquisition for Aquaponics," www.semanticscholar.org, 2017. https://www.semanticscholar.org/paper/Environmental-parameter-monitoring-and-Data-for-Nichani/5baa0bf2867f2ef4e19498cf0f735ab9e374152b (accessed Jul. 28, 2022).

[19] E. Díaz Ronceros, "Relevancia de la ejecución experimental de proyectos con microcontroladores en el aprendizaje de la ingeniería electrónica," Educación, vol. 29, no. 56, pp. 48–72, 2020, doi: 10.18800/educacion.202001.003.

[20] S. Paola, G. Jurado, and M. Antonio, "Red inalámbrica de sensores para el monitoreo de la calidad del agua en la crianza de peces," May 2019. Accessed: Jul. 01, 2022. [Online]. Available: https://redi.uta.edu.ec/bitstream/123456789/69756/1/Santos%20Benavides%20Paola%20Graciela%20-2019.pdf

[21] N. van Doremalen et al., "Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1," New England Journal of Medicine, vol. 382, no. 16, pp. 1564–1567, Mar. 2020, doi: 10.1056/nejmc2004973.

ADHD treatment in adults through a virtual reality game

Tratamiento de TDAH en adultos mediante un juego de realidad virtual

Ana Alvarez-Suarez
Faculty of engineering
Universidad Militar Nueva Granada
Cajicá, Colombia
est.ana.alvarez1@unimilitar.edu.co

Oscar I. Caldas
Faculty of engineering
Universidad Militar Nueva Granada
Cajicá, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-3105-4656

***Abstract*—** Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD), despite being a pathology that occurs in childhood, shows difficulties for people who continue to develop symptoms until adulthood, current technological tools for treatment are aimed at children or they have high-cost signal acquisition equipment, which is why the following research aims to design a virtual reality (VR) game based on standardized tests for this disorder such as the continuous performance test (CPT) to quantify symptoms and monitor their improvement. The methodology for the design of the game and the measurements that are required during it are presented, as well as their respective calculations. An experiment is carried out with 37 participants of a table tennis game with two groups, one in a real environment with physical balls and the other in a VR environment. When analyzing the results, it is statistically found that there is better performance in inattention, impulsivity and sustained attention when performing the VR therapy.

Keywords*—virtual reality (VR), attention deficit hyperactivity disorder (ADHD), neuropsychological tests, cognitive abilities, rehabilitation.**)*

I. Introducción

El trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) se define como una enfermedad del neurodesarrollo, que afecta las condiciones neurológicas que aparecen en la primera infancia: la atención, la memoria, la percepción, el lenguaje, la resolución de problemas y la interacción social [1]. A pesar de ser un trastorno que aparece antes de los 12 años, los síntomas pueden permanecer durante la adultez y causar problemas para el desarrollo de actividades, generando mayores riesgos de desempleo, disminución de los logros educativos, mayor accidentabilidad al conducir, aumento de la probabilidad del abuso de sustancias y la criminalidad [2].

La prevalencia del TDAH está en un porcentaje del 2,5 al 5% en adultos a nivel mundial, mientras en Latinoamérica aproximadamente hay 36 millones de habitantes que presentan este trastorno. En Colombia, uno de los países con mayor prevalencia a nivel mundial, el 17% de la población ha sido diagnosticada [3].

Los criterios para el diagnóstico según el Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales, quinta edición (DSM-V) son patrones como dificultad para mantener la atención, seguir instrucciones, recordar tareas e incomodidad en situaciones sociales durante al menos seis meses. Dependiendo de la intensidad de los síntomas se puede presentar de forma combinada, predominante con falta de atención o predominante hiperactiva/impulsiva. Para realizar el diagnóstico se realizan usualmente autoevaluaciones, pruebas neurofisiológicas, pruebas de laboratorio y en algunos casos estudios neurológicos y genéticos para contribuir a la detección biológica [4], [5].

El tratamiento en la actualidad se centra principalmente en el uso de fármacos estimulantes acompañados de terapia psicológica. La terapia consiste en ejercicios de neurorretroalimentación para incentivar al paciente a mantener la atención, ejecutar múltiples tareas a la vez, tomar decisiones y resolver problemas. Algunas de las pruebas empleadas para esto son rompecabezas, *sudokus* o patrones en matrices, asimismo, son comunes las pruebas de Escala Wechsler de Inteligencia Para Adultos (WISC-IV) de cancelación, búsqueda de símbolos, claves, entre otras y el Test de Ejecución Continua (CPT) donde se evalúa el paciente constantemente a medida que hace la prueba [5]. Las sesiones de terapia suelen ir guiadas por manuales como el Programa de razonamiento y rehabilitación (R&R2ADHD) y el programa Safren, para llegar a objetivos específicos [6]–[8].

Uno de los problemas de la terapia tradicional es su subjetividad y la dependencia de la observación del profesional a cargo o de los familiares, además que no permite cuantificar el comportamiento del paciente y consume demasiado tiempo (más de 40 minutos) prueba [7]. Es por esto, que a través de diferentes investigaciones se ha demostrado que, con el uso de tecnologías de realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV), se obtienen resultados positivos en el tratamiento y diagnóstico de patologías psicológicas [7]–[9] entre ellas el TDAH, con la ventaja de eliminar o mitigar la mayoría de las desventajas señaladas.

En especial, se ha encontrado que, gracias a la validez ecológica, es decir la similitud que tiene la realización de las pruebas en un entorno inmersivo al respecto al tratamiento estandarizado, tiene resultados más precisos el uso de RV que el uso de RA o juegos de computador [10]. Por otra parte, en ciertas aplicaciones se ha identificado que la inmersión y el nivel la presencia (sensación de estar dentro del ambiente) de RV contribuyen a un mejor rendimiento, compromiso y aprendizaje específico de habilidades [11].

En la actualidad, gran parte de las plataformas diseñadas en RV están ambientadas en aulas de clase y por lo tanto dirigidas al tratamiento de niños a pesar de la prevalencia del TDAH en adultos [7], [9]. Asimismo, en la mayoría de estudios no se tiene en cuenta la incorporación de actividad física como método para abordar el tratamiento de los síntomas de hiperactividad/impulsividad. Por otra parte, es

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00069

necesario el monitoreo de las estadísticas del paciente a través de métodos no costosos como los manuales o pruebas neuropsicológicas estandarizadas que permiten una cuantificación del comportamiento según el desempeño en el juego. En su lugar se emplean señales fisiológicas como electroencefalografía (EEG), seguimiento de marcadores físicos y hemoencefalografía [11]–[13].

Teniendo en cuenta lo anterior, se planteó la pregunta de investigación: ¿De qué manera contribuye un juego de realidad virtual a una mayor reducción de los síntomas principales del trastorno de déficit de atención e hiperactividad? Para abordar esta pregunta, se diseñó un experimento controlado en el que se adaptó un juego de realidad virtual para ejecutar el test de Ejecución Continua y poder así comprobar la siguiente hipótesis:

H1: La inatención y la impulsividad disminuyen significativamente si los tratamientos estandarizados se desarrollan en RV.

Se presenta a continuación el diseño de un juego de tenis de mesa en RV, las variables que serán medidas, los cálculos que permiten asociar estas medidas a los síntomas del TDAH, principalmente inatención e impulsividad, y se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

A. Antecedentes

Uno de los estudios que utilizó un entorno 3D virtual no inmersivo hace una comparación entre este método y videos. Se analizó cómo la posibilidad de interacción con el ambiente del tratamiento permite que los pacientes tengan un mejor desempeño y mejora en síntomas relacionados al TDAH o dislexia en niños [14].

En un estudio de Fokides et al., se diseñó una interfaz cerebro-computadora (BCI) portátil de un solo canal. Estaba basada en RA y en potenciales evocados visuales de estado estacionario (SSVEP) para el control de un robot para terapia de TDAH en niños. El sistema logró superar los desafíos relacionados con la inmersión y la portabilidad, sin embargo, no se lleva a cabo una prueba experimental que evalúe la funcionalidad como terapia y no solo las características técnicas del sistema [12].

Esto mismo ocurre en la investigación de Rajshekar y Lingaraju [16], se diseña un ambiente interactivo de RA para niños con distintas actividades como inflar un globo y doblar una cuchara mediante señales EEG, sin embargo, solo se llegó a teorizar sobre la motivación que esto produce en pacientes y no en la eficacia como tratamiento [16].

Por otra parte, dentro de los juegos de realidad virtual donde se han hecho pruebas sobre una muestra de pacientes con TDAH, está Virtual Classroom. Aquí además se implementan señales fisiológicas como EEG, movimientos oculares y seguimiento de los miembros superiores [9]. Se emplean estímulos tanto visuales como auditivos para crear distracciones en un contexto de salón de clases, un lugar común en el que se presentan los síntomas de TDAH en niños. En este estudio se identificaron en sesiones de 45 minutos los cambios de foco de atención mediante las variaciones en la posición de las señales fisiológicas, un análisis de la densidad espectral de las ondas alfa, beta, pruebas auditivas y test de ejecución continua (CPT).

Otro de los estudios emplea hemoencefalografía que funciona como biorretroalimentación para estimular el riego sanguíneo del cerebro, aumentando el suministro de oxígeno en la zona prefrontal, encargada de la producción de dopamina y por lo tanto de la inhibición de impulsos, además de los procesos cognitivos [14]. En este estudio se encontró que esta estimulación más el uso de realidad virtual tiene efectos positivos después de diez sesiones de diez minutos por semana Mostró mejoras en la inteligencia fluida, la vigilancia, la atención y la atención dividida.

Como alternativa a la hemoencefalografía una investigación propone la actividad física. Esta demuestra un desempeño similar a la estimulación directa del lóbulo frontal. Se aplica en niños de 8 a 12 años durante dieciocho sesiones, tres veces a la semana. Aquí se emplean cámaras de captura de seguimiento, una caminadora y se simula el recorrido en un parque con obstáculos para el tratamiento de la atención dividida, problemas cognitivos, hiperactividad, mejora de la planeación y selección de respuestas [18].

Incluso en los estudios mencionados anteriormente en los que se emplearon señales fisiológicas también incluyeron pruebas neuropsicológicas: CPT, Winsconsin Card Sorting Test (WCST), Adult ADHD Self-Report Scale (ASRS), Junior Temperament and Character Inventory (JTCI), Swanson, Nolan, and Pelham (SNAP-IV) y Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-IV). Técnicas que además de estar validadas para el diagnóstico o seguimiento de síntomas de TDAH de sesión a sesión, son menos costosas que el uso de equipos para adquisición de señales, lo que las hacen más asequible para la población. Esto se ve en la reconocida plataforma Nesplora [10], que detecta el control de interferencia al generar estímulos sobre el paciente, la flexibilidad cognitiva y la atención enfocada mediante una variante del CPT, el paradigma go-no go. Todo en un ambiente enfocado a las tareas cotidianas que realiza un sujeto en el trabajo, en este caso simulado como un acuario, logrando identificar síntomas de TDAH con las mediciones en sesiones de 20 minutos.

Una de las investigaciones que incorpora dos de los factores mencionados anteriormente, las pruebas CPT y la actividad física fue desarrollada por Yang-Kun Ou et al., [19] y consiste en una plataforma con tres juegos inmersivos cada uno de 40 minutos en sesiones tres veces a la semana durante tres meses, este fue probado en niños de 8 a 12 años. Los juegos diseñados consisten en distintos escenarios como un tren en movimiento y un submarino en los que van avanzando objetos hacia los participantes y deben esquivar o atrapar mediante la realización de ejercicios de coordinación y balance. En este estudio, al igual que en el mencionado anteriormente de la caminadora, se observaron mejoras en la atención selectiva, sostenida alternada y dividida, disminución en los errores en respuesta, en la hiperactividad, impulsividad y la oposición. Esta mejora se atribuyó a la incorporación de la actividad física para el estímulo de zonas frontales del cerebro.

En otros estudios, donde no se incluía la actividad física como en Eye-Contact Game, un juego inmersivo de realidad virtual [12], a través de la medida de los errores de omisión y comisión se logró identificar una mejora solo en los niveles de atención y no en los de hiperactividad.

Otros síntomas secundarios asociados al TDAH como los problemas de memoria a corto y largo plazo, dificultad de establecer relación de confianza con el terapeuta, dificultad en la lectura y baja tolerancia a la frustración han sido trabajados

tanto en entornos inmersivos como no inmersivos, en juegos de exploración de islas, habitaciones, salones de clase o aplicaciones móviles para el desarrollo en específico de estas habilidades. Las sesiones de estos duraban entre 20 a 40 minutos, sin embargo, el tiempo de aplicación para el tratamiento de memoria era de tres días, mientras que el de habilidades de lectura y la frustración de tres meses [20]–[23].

A partir de esta información, se concluye que la estimulación de la zona frontal del cerebro mediante la actividad física es una parte fundamental para el manejo de la impulsividad, que las pruebas neuropsicológicas son una técnica de bajo costo y efectiva para el seguimiento de los síntomas y que hay una necesidad de realizar más investigación acerca del uso de tecnologías para el tratamiento de TDAH en adultos.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño del juego

Se planteó un juego de tenis de mesa para ser realizado en dos entornos distintos, uno de forma real y otro en un ambiente de realidad virtual inmersiva. En ambos se buscaba medir la inatención e hiperactividad de los participantes.

1) Terapia de referencia

El Programa de razonamiento y rehabilitación R&R2ADHD es un manual diseñado para adolescentes y adultos (+13 años) que presenten conductas antisociales o comportamientos asociados a algunas de las características del TDAH que pueden generar problemas interpersonales, en el trabajo y poca productividad. El programa incluye cinco módulos: neurocognitivo, solución de problemas, control emocional, habilidades sociales y razonamiento crítico. El neurocognitivo incluye actividades de seguir instrucciones mientras se presentan distractores para medir la cantidad de aciertos del paciente, o seguir una orden hasta escuchar *STOP* [5].

Por otra parte, el Test de Ejecución Continua (CPT), es una prueba que tiene como misión la medición de la atención o vigilancia. Tiene una variación en la prueba Go/No-Go para la medición principalmente de la hiperactividad, ambas pruebas consisten en la presentación de estímulos que pueden ser objetivos o no objetivos y se muestran con frecuencias diferentes con el fin de observar la capacidad de mantener la atención en los casos que el estímulo es infrecuente y el esfuerzo por evitar reaccionar ante este cuando es frecuente. La aplicación de estos tests es de 14 minutos aproximadamente y se presentan los estímulos en intervalos de 1 a 4 segundos [24].

2) Diseño

A partir del programa R&R2ADHD para el tratamiento de TDAH en jóvenes y adultos mediante terapia cognitivo conductual, específicamente en el módulo de habilidades neurocognitivas (control de atención e impulsos) y las pruebas para detección de síntomas CPT y Go/No-Go, se propuso un entorno virtual para realizar un juego mientras se van cambiando las instrucciones, para poner a prueba la atención y la impulsividad. El juego en total tiene una duración de 15 minutos aproximadamente.

Se consideró la inclusión de actividad física por los resultados positivos que ha mostrado anteriormente en la disminución de impulsividad y mejora de procesos cognitivos al estimular el flujo sanguíneo en el lóbulo frontal [13, 17].

El juego consiste en una sala de tenis de mesa, con elementos cotidianos como muebles, un televisor, cuadros y mesas. Al iniciar el juego se da la instrucción de golpear cada pelota blanca que venga del lado contrario de la mesa, durante 3 minutos, a modo de entrenamiento.

Después de un descanso de 1 minuto, se cambia la instrucción para la llamada Ronda 1: golpear solo la pelota de color verde y evitar las de otro color, esta parte termina cuando hayan pasado 6 minutos. Por último, después de un descanso de 30 segundos, la instrucción anterior se invierte y se deberán golpear todas las pelotas menos la de color verde, la cual se debe evitar. Esta Ronda 2 dura también 6 minutos.

Las pelotas aparecen con un intervalo de 1.5 segundos, aproximadamente. Las instrucciones y la cuenta regresiva del juego se visualizan en letreros sobre la pantalla (Ver Fig. 1).

Fig. 1. Ambiente virtual del juego de tenis de mesa. A la izquierda se ve el escenario completo. A la derecha la visualización del jugador.

Para evaluar el impacto del entorno virtual y comprobar la hipótesis planteada, se estableció un grupo de control que desarrollaría la misma metodología experimental, pero en un entorno real. La actividad está dirigida por una persona encargada de lanzar pelotas reales, asegurando la misma frecuencia mediante un metrónomo y una grabación para tomar las medidas de forma manual posterior al juego. El procedimiento de la aplicación de las pruebas es como se observa en la Fig. 2.

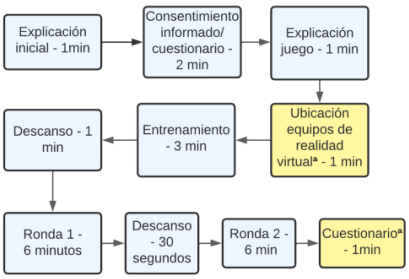


Fig. 2. Procedimiento para la ejecución de la prueba experimental. [a]Son procedimientos que solo se realizan en la prueba de realidad virtual.

La duración total de cada sesión fue de 20 minutos y 30 segundos en entorno real, de 22 minutos y 30 segundos para el entorno de RV.

a) Cuestionarios

En la Fig. 2 se evidencia que se aplicaron dos cuestionarios (paso 2 y paso 10), siendo el último únicamente para el entorno de RV.

El primero corresponde a información demográfica, aquí se obtuvo información de edad, género, diagnóstico de TDAH, presencia de daltonismo y para el caso de los que realizaron la terapia de RV, se agregó la pregunta de presencia de desórdenes psicomotrices.

El segundo es el cuestionario de neurociencia de realidad virtual (VRNQ) [25] donde se evaluaron tres componentes:

- Experiencia del usuario, referente al nivel de inmersión, calidad de gráficos, audio y hardware adecuado.
- Asistencia del juego, acerca la facilidad de comprensión de las instrucciones y tutoriales durante el juego.
- Síntomas y efectos inducidos por RV (VRISE), se verifica que el juego no esté generando nauseas, desorientación, mareo, fatiga o inestabilidad en el usuario.

B. Hardware y Software

El grupo de control empleó una mesa de ping-pong estándar, con raqueta y pelotas de colores. El grupo experimental empleó una versión virtual del escenario, desarrollada en Unity 3D versión 2021.3.1f1 (ver Fig 1.). Para permitir al usuario participar de forma inmersiva, se emplearon los controles manuales, sensores y visor del Oculus Rift.

El procesamiento de los datos se realizó en Matlab R2022a y el análisis estadístico se realizó mediante IBM SPSS Statistics 28.0.

C. Mediciones y variables

Se buscaba medir el nivel de atención del sujeto, la atención sostenida, la capacidad inhibitoria, la disminución de niveles de impulsividad/hiperactividad y la flexibilidad cognitiva. Para eso se parte de los principios usados en CPT y Go/No go task mediante las ecuaciones (1) y (2) [17]

$$T = C + I + K \tag{1}$$

$$I = OE + CE \tag{2}$$

Donde en (1) T representa el número de intentos, C el número de respuestas correctas, I el número de respuestas incorrectas y K los intentos incompletos. En (2) OE representa los errores de omisión (pasó el tiempo asignado y no fue devuelta la pelota indicada) y CE los errores de comisión (devolvió una pelota equivocada).

A partir de las variables, el tiempo de realización del juego, si logra terminarlo exitosamente, el número de aciertos, los errores de comisión y los de omisión, se hace una aproximación a la mejora de los síntomas. Siendo puntualmente:

1) Tiempo de respuestas correctas (μCRT): el tiempo que tarda en contestar acertadamente, y mide déficits de atención. Mientras mayor sea este valor, más probable presentar un déficit de atención, pues tarda más el sujeto en realizar la actividad si no tiene la habilidad de enfocarse. Para simplificar la medida se saca la media de estos valores. Al sacar el rango de esta medida de una ronda a otra (RCRT), se obtiene la atención sostenida, dada por la capacidad de mantenerse enfocado a pesar del cambio de instrucción

$$\mu CRT = \sum_{i=1}^{C} \frac{CRT}{C} \tag{3}$$

*2) Desviación estándar de CRT (σ*CRT*):* indicativo de síntomas de impulsividad e hiperactividad. Mientras mayor sea el valor de *σ*CRT, más probable que el paciente sufra de impulsividad e hiperactividad. Esto debido a que mientras haya una mayor diferencia entre la respuesta de una pelota y otra indica más movimiento y por lo tanto menor capacidad de controlar la actividad.

$$\sigma CRT = \sqrt{\frac{1}{1-C} * \sum_{i=1}^{C} (CRT_i - M)^2} \tag{4}$$

3) Tiempo de prueba (θ): es el tiempo estblecido para devolver cada pelota.

4) Factor de compromiso (GF): es el interés que muestra el sujeto durante la sesión.

$$GF = \frac{C+I}{T} \tag{5}$$

5) Factor de inatención (IAF): representa el porcentaje de inatención durante la sesión.

$$IAF = \frac{OE}{C+I} \tag{6}$$

6) Factor de impulsividad (IMF): representa el porcentaje de impulsividad durante una sesión.

$$IMF = \frac{CE}{C+I} \tag{7}$$

7) Factor de error (EF): tasa de error de un participante de una sesión. Al sacar la diferencia de esta variable (REF) de una ronda a otra se obtiene la capacidad de adaptarse a la nueva instrucción, es decir la flexibilidad cognitiva.

$$EF = \frac{OE+CE}{C+I} \tag{8}$$

8) Factor de respuestas correctas (CRF): es la relación entre el tiempo total que tiene el participante para devolver cada pelota y el tiempo que tarda realmente durante el juego.

$$CRF = \frac{\sum_{i=1}^{C} CRT}{C*\theta} \tag{9}$$

9) Índice de desempeño (PI): medición del desempeño general del paciente dependiendo de CRF, EF y GF.

$$PI = \frac{(1-EF)+(1-CRF)}{2} * GF \tag{10}$$

D. Población

En este estudio se midió el desempeño de 37 participantes adultos (10 mujeres y 27 hombres), el 40.5% con una edad entre 18 y 20, el 59.5% entre 20 y 22 años y un 2.7% entre 23 y 28 años. De estos, 17 realizaron el juego de tenis de mesa en el entorno real y 20 en el ambiente de RV. Se emplearon los

siguientes criterios de inclusión: población mayor de 18 años que deseaban contribuir de forma voluntaria. Como criterios de exclusión: no haber tomado medicación para TDAH durante las últimas 24 horas, no tener daltonismo que impida diferenciar el color verde, no tener patologías que impidan el movimiento de las extremidades, no tener condiciones cognitivas que impidan la realización o comprensión de la prueba y no tener desórdenes psicomotrices que no permitan el uso de realidad virtual.

E. Análisis estadístico

Se emplearon medidas de tendencia (media) y de dispersión (varianza), análisis de normalidad de Shapiro-Wilk, la prueba T de muestras independientes para datos con distribución normal y la prueba no paramétrica para dos muestras independientes U de Mann-Whitney para los no-normales, y el tamaño de efecto a partir de la d de Cohen y el factor Z [25].

$$d = \frac{|Z|}{\sqrt{N}} \tag{8}$$

Para obtener el tamaño de efecto a partir de Z se usa la ecuación mostrada en (8) donde d representa el tamaño de efecto, Z la prueba de contraste y N el total de participantes.

III. RESULTADOS

Los 37 participantes completaron en su totalidad la sesión, es decir que la variable K fue en todos los casos 0 y por lo tanto GF tuvo un valor de 1.00 para cada uno de ellos.

El cuestionario de neurociencia de realidad virtual (VRNQ) (ver tabla I) mostró puntajes por encima del valor mínimo establecido por Kourtesis et al. (25) para la experiencia de usuario y la asistencia de en el juego y por encima de 30 para los síntomas y efectos inducidos por RV [24].

TABLE I. RESULTADOS CUESTIONARIO NEUROCIENCIA DE LA REALIDAD VIRTUAL

Experiencia de usuario	26
Asistencia juego	27
Síntomas y efectos inducidos por realidad virtual (VRISE)	32

Se calcularon las variables mencionadas anteriormente para cada uno de los participantes de forma separada por el tipo de terapia, (real o ambiente de RV) y se realizó un análisis de distribución de normalidad. Solo un grupo de datos, correspondiente a µCRT presentó una distribución normal por lo que se aplicó el test T de pruebas independientes y para los demás conjuntos de datos se eligió la prueba no paramétrica para muestras independientes U de Mann-Whitney. Aquí se obtuvo el nivel de significancia acorde la d de Cohen y el factor Z respectivamente. Asimismo, se calculó el promedio y la desviación estándar para cada una de las sesiones.

TABLE II. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA, RESULTADOS PRUEBA T Y U DE MANN WHITNEY

	TIPO	$\overline{X}$	s	p	Tamaño de efecto
µCRT[a]	***Físico***	0,58	0,18	<0,001	0,129[b]
	RV	0,70	0,05		
σCRT[a]	***Físico***	0,149	0,053	0,043	0,332
	RV	0,116	0,028		
IAF[a]	***Físico***	0,059	0,042	0,034	0,348
	RV	0,052	0,098		
IMF[a]	***Físico***	0,026	0,030	<0,001	0,627
	RV	0,105	0,067		
EF[a]	***Físico***	0,085	0,055	0,048	0,326
	RV	0,156	0,145		
CRF[a]	***Físico***	0,385	0,121	0,010	0,423
	RV	0,467	0,033		
PI[a]	***Físico***	0,765	0,055	<0,001	0,563
	RV	0,688	0,077		
REF[a]	***Físico***	0,118	0,136	0,008	0,433
	RV	0,246	0,160		
RCRT[a]	***Físico***	0,083	0,067	0,008	0,438
	RV	0,037	0,045		

[a] µCRT = tiempo de respuestas correctas, σCRT = desviación estándar, IAF = factor de inatención, IMF = factor de impulsividad, EF = factor de error, CRF = factor de respuestas correctas, PI = índice de desempeño, REF = diferencia factor de error entre rondas, RCRT = diferencia tiempo de respuestas correctas entre rondas

[b] Tamaño de efecto calculado con d de Cohen

Como se puede observar en la tabla II todas las variables tuvieron cambios estadísticamente significativos. Por otra parte, el tamaño de efecto mostró una correlación baja para µCRT, media para σCRT, IAF, EF, CRF, REF y RCRT y una correlación alta para IMF y PI.

Para poder visualizar en qué entorno fueron mejores los resultados de los participantes en la prueba, se realizó una gráfica (Fig. 3) comparando el desempeño en cada una de las variables según el tipo de ambiente.

Se esperaba que las variables µCRT, σCRT, IAF, IMF, EF, CRF, REF Y RCRT presentaran valores más bajos en RV, lo que indicaría mejores resultados. Mientras que PI debía tener un puntaje más alto para indicar un mejor desempeño.

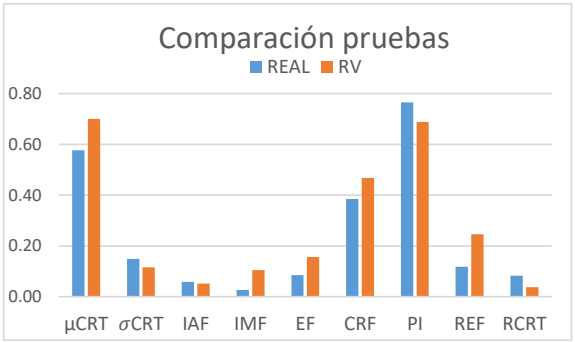


Fig. 3. Comparación de resultados prueba en entorno real y de realidad virtual. µCRT = tiempo de respuestas correctas, σCRT = desviación estándar de CRT, IAF = factor de inatención, IMF = factor de impulsividad, EF = factor de error, CRF = factor de respuestas correctas, PI = índice de desempeño, REF = diferencia factor de error entre rondas, RCRT = diferencia tiempo de respuestas correctas entre rondas

En la anterior figura se evidencia un mejor desempeño en las variables µCRT, IMF, EF, CRF, PI y REF para los sujetos que hicieron la prueba en un entorno físico. Mientras que en las variables σCRT, IAF y RCRT el resultado fue mejor para quienes realizaron la sesión en un ambiente de realidad virtual.

IV. DISCUSIÓN

A partir de los valores obtenidos del cuestionario de neurociencia de la realidad virtual se confirma la viabilidad

del juego implementado al tener la calidad de gráficos, audio, hardware y duración adecuada, además de no presentar síntomas o efectos inducidos por RV.

Con el valor de significancia se encuentra que todas las variables tienen cambios relevantes de un entorno a otro. Específicamente la hiperactividad (σCRT), el factor de inatención (IAF) y la atención sostenida (RCRT) tienen puntajes menores (Fig. 3) y, por lo tanto, mejores resultados en el entorno de RV. Es decir, hay una menor inatención, una menor hiperactividad y una mayor atención sostenida cuando la terapia se lleva a cabo en RV.

El desempeño positivo de la variable σCRT, pero no de IMF en RV siendo ambos indicadores de la impulsividad se puede deber a la falta de familiarización del movimiento dentro de este tipo de entorno, debido a que IMF dependía directamente de los errores de comisión, en un entorno real en el que no se están usando las gafas y controles puede ser más sencillo el realizar los movimientos de esquivar pelotas.

Asimismo, el resultado en el juego de otras variables como μCRT, REF y PI, también se pudo ver afectado por la interacción con el ambiente RV, al ser el primer contacto con este tipo de entorno que tuvieron algunos de los participantes, los tiempos de respuesta, adaptación y desempeño general se redujeron posiblemente por el interés del sujeto en explorar lo que estaba a su alrededor y no específicamente en seguir todas las instrucciones del juego.

Por otra parte, el tamaño de efecto mostró en la mayoría de los casos una correlación media, es decir que los cambios significativos de las variables mencionadas anteriormente sí fueron afectados por el tipo de entorno, sin embargo, se podría esperar un valor más alto de esta correlación si se realizan más sesiones de la terapia.

V. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la implementación de un juego de tenis de mesa real y uno en un ambiente de RV basados en la terapia tradicional para TDAH y haciendo seguimiento mediante CPT en 37 participantes adultos en una sesión de aproximadamente 22 minutos, a los cuales se les realizaron mediciones de aciertos, errores de omisión, comisión y tiempos de respuesta. A partir de estas medidas se calcularon nueve variables que funcionan como indicadores del desempeño en cada sujeto y con los que se hizo un análisis estadístico de su mejora.

Se demostró estadísticamente que la realización de esta prueba en un ambiente de realidad virtual inmersiva puede tener efectos más positivos en la inatención, la atención sostenida y moderadamente en la hiperactividad en jóvenes adultos que al llevarse a cabo de forma física.

Como trabajo futuro se propone la realización de más sesiones de terapia para mejorar la correlación y para observar las diferencias no solo en distintos ambientes sino también los cambios de una sesión a otra, y poder analizar si este tipo de juegos puede presentar además de mejores resultados en RV, una evolución significativa de los síntomas.

VI. CONSIDERACIONES ÉTICAS

Todos los sujetos participaron de forma voluntaria luego firmar un consentimiento informado. El protocolo experimental fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Militar Nueva Granada mediante el código INV ING - 3504, en donde se tomaron las precauciones necesarias para mitigar los posibles riesgos físicos y morales.

VII. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Mauricio Rodríguez, presidente del Capítulo Computer Society de la rama IEEE de la Universidad Nacional de Colombia y a los estudiantes de esta misma institución por su asistencia técnica durante el diseño del juego. Este es un producto resultado del proyecto de investigación INV-ING-3504 titulado "Estudio del efecto del estado emocional en la propiocepción y la respuesta psicofisiológica en tareas de rehabilitación motora de miembro superior", financiado por la Universidad Militar Nueva Granada.

REFERENCIAS

[1] J. R. Valdizán and A. C. Izaguerri-Gracia, "Trastorno por déficit de atención/hiperactividad en adultos," Revista de Neurologia, vol. 48, no. SUPPL. 2, pp. 95–99, 2009.

[2] C. Cavanillas, "Facultad de Psicología CBT Treatment in adults with ADHD: A systematic review," 2019.

[3] J. L. Llanos Lizcano, D. J. García Ruiz, H. Gonxález Torres, and P. Puentes Rozo, "Trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) en niños escolarizados de 6 a 17 años," *Pediatría atención primaria*, vol. 21, pp. 101–108, 2019.

[4] "Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-V American Psychiatric Association," 2013. [Online]. Available: www.appi.org

[5] T. Fullen, S. L. Jones, L. M. Emerson, and M. Adamou, "Psychological Treatments in Adult ADHD: A Systematic Review," *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, vol. 42, no. 3. Springer, pp. 500–518, Sep. 01, 2020. doi: 10.1007/s10862-020-09794-8.

[6] S. Goharinejad, S. Goharinejad, S. Hajesmaeel-Gohari, and K. Bahaadinbeigy, "The usefulness of virtual, augmented, and mixed reality technologies in the diagnosis and treatment of attention deficit hyperactivity disorder in children: an overview of relevant studies," *BMC Psychiatry*, vol. 22, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12888-021-03632-1.

[7] F. Cibrian, G. Hayes, and K. Lakes, "Research Advances in ADHD and Technology," *Morgan & Claypool publishers*, 2021.

[8] S. Adabla, L. Nabors, and K. Hamblin, "A Scoping Review of Virtual Reality Interventions for Youth with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder," *Adv Neurodev Disord*, vol. 5, no. 3, pp. 304–315, Sep. 2021, doi: 10.1007/s41252-021-00207-9.

[9] Y. Tan *et al.*, "Virtual Classroom: An ADHD Assessment and Diagnosis System Based on Virtual Reality; Virtual Classroom: An ADHD Assessment and Diagnosis System Based on Virtual Reality," 2019.

[10] D. Areces, T. García, M. Cueli, and C. Rodríguez, "Is a virtual reality test able to predict current and retrospective ADHD symptoms in adulthood and adolescence?," *Brain Sci*, vol. 9, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/brainsci9100274.

[11] O. I. Caldas, N. Sanchez, M. Mauledoux, O. F. Avilés, and C. Rodriguez-Guerrero, "Leading presence-based strategies to manipulate user experience in virtual reality environments," *Virtual Real*, 2022, doi: 10.1007/s10055-022-00645-3.

[12] S. Kim, J. H. Ryu, Y. Choi, Y. S. Kang, H. Li, and K. Kim, "Eye-contact game using mixed reality for the treatment of children with attention deficit hyperactivity disorder," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45996–46006, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977688.

[13] P. Arpaia, S. Criscuolo, E. de Benedetto, N. Donato, and L. Duraccio, "A Wearable AR-based BCI for Robot Control in ADHD Treatment: Preliminary Evaluation of Adherence to Therapy," in *2021 15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2021 - Proceedings*, 2021, pp. 321–324. doi: 10.1109/TELSIKS52058.2021.9606352.

[14] S. Skalski, K. Konaszewski, G. Pochwatko, R. Balas, and J. Surzykiewicz, "Effects of hemoencephalographic biofeedback with virtual reality on selected aspects of attention in children with ADHD," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 170, pp. 59–66, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2021.10.001.

[15] E. Fokides, M. I. Chronopoulou, and P. Kaimara, "Comparing videos and a 3D virtual environment for teaching school-related functional skills and behaviors to students with ADHD or developmental dyslexia, displaying challenging behaviors: a case study," *Res Pract Technol Enhanc Learn*, vol. 14, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1186/s41039-019-0117-0.

[16] G. S. Rajshekar Reddy and L. G M, "A Brain-Computer Interface and Augmented Reality Neurofeedback to Treat ADHD: A Virtual Telekinesis Approach," in *Adjunct Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2020*, Nov. 2020, pp. 123–128. doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct51615.2020.00045.

[17] S. Alqithami, M. Alzahrani, A. Alzahrani, and A. Mustafa, "AR-therapist: Design and simulation of an AR-game environment as a CBT for patients with ADHD," *Healthcare (Switzerland)*, vol. 7, no. 4, Dec. 2019, doi: 10.3390/healthcare7040146.

[18] S. Shema-Shiratzky *et al.*, "Virtual reality training to enhance behavior and cognitive function among children with attention-deficit/hyperactivity disorder: brief report," *Dev Neurorehabil*, vol. 22, no. 6, pp. 431–436, Aug. 2019, doi: 10.1080/17518423.2018.1476602.

[19] Y. K. Ou, Y. L. Wang, H. C. Chang, S. Y. Yen, Y. H. Zheng, and B. O. Lee, "Development of virtual reality rehabilitation games for children with attention-deficit hyperactivity disorder," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 11, no. 11, pp. 5713–5720, Nov. 2020, doi: 10.1007/s12652-020-01945-9.

[20] V. Baumann *et al.*, "Exploration of a novel virtual environment improves memory consolidation in ADHD," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-78222-4.

[21] M. C. Barba *et al.*, "BRAVO: A gaming environment for the treatment of ADHD," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2019, vol. 11613 LNCS, pp. 394–407. doi: 10.1007/978-3-030-25965-5_30.

[22] F. Blume, M. Quixal, J. Hudak, T. Dresler, C. Gawrilow, and A.-C. Ehlis, "Development of Reading Abilities in Children with ADHD Following fNIRS-Neurofeedback or EMG-Biofeedback," *Lernen und Lernstörungen*, vol. 9, no. 3, pp. 163–174, Jul. 2020, doi: 10.1024/2235-0977/a000302.

[23] A. B. Ocay, R. A. Rustia, and T. D. Palaoag, "Utilizing augmented reality in improving the frustration tolerance of ADHD learners: An experimental study," Oct. 2018. doi: 10.1145/3284497.3284499.

[24] S. Kertzman *et al.*, "Impaired Continuous Performance Test and the Go/ NoGo Task, but Intact Context Sensitivity, in Patients with Schizophrenia," 2020.

[25] P. Kourtesis, S. Collina, L. A. A. Doumas, and S. E. MacPherson, "Validation of the Virtual Reality Neuroscience Questionnaire: Maximum Duration of Immersive Virtual Reality Sessions Without the Presence of Pertinent Adverse Symptomatology," *Front Hum Neurosci*, vol. 13, Nov. 2019, doi: 10.3389/fnhum.2019.00417.

Design and implementation of an experimental cultivation chamber with LED lights and preliminary tests with lettuce (*Lactuca Sativa L.*)

Diseño e implementación de una cámara de cultivo experimental con luces LED y pruebas preliminares con lechuga (*Lactuca Sativa L.*)

Víctor Guillén Pérez
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales – Universidad Tecnológica de Panamá.
Panamá
victor.guillen@utp.ac.pa

Jorge Serrano R
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales – Universidad Tecnológica de Panamá.
Panamá
jorge.serrano1@utp.ac.pa

Yamileth Pittí Pinzón
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales – Universidad Tecnológica de Panamá.
Panamá
yamileth.pitti@utp.ac.pa

Héctor Rosales
Centro Regional de Coclé – Universidad Tecnológica de Panamá.
Panamá
hector.rosales@utp.ac.pa

***Abstract*- Various statistics indicate that as the concentration of the population in urban areas grows, the demand for more and better food in these urban or suburban places increases proportionally. For this reason, new and innovative cultivation systems are being used worldwide, whose main characteristics are: soilless farms, protected and controlled environments, CO2 supply, nutrient solution, artificial lights, temperature, humidity and air movement control, and which are known as "Vertical Agriculture", Urban Agriculture or "Plant Factory with Artificial Lights". Panama does not have laboratories to generate knowledge with these new production models, so the main objective of this research was to build and test a plant factory-type infrastructure with artificial light in the facilities of the Agroindustrial Production and Research Center. Among the specific objectives, it was planned to carry out accumulated germination and growth tests on romaine lettuce and subject the seedlings to LED lights using a prototype lamp built at CEPIA and commercial lights. The study met the objective of building and testing the laboratory in an area of 45 m2. It was also possible to establish the percentage of accumulated germination of lettuce, the fresh weight of the plants, number of leaves and the approximate time of the crop cycle. In addition, it was possible to successfully test the lamp prototype built at CEPIA, which had three LED light spectra, for the growth of romaine lettuce**.

Keywords-*LED lamp, lettuce, germination, plant factory with artificial lights, PFAL.*

***Resumen* - Diversas estadísticas señalan que en la medida que crece la concentración de la población en las áreas urbanas aumenta proporcionalmente la demanda de más y mejores alimentos en estos sitios urbanos o suburbanos. Por ello nuevos e innovadores sistemas de cultivo están siendo utilizados a nivel mundial, cuyas principales características son:-explotaciones sin suelo, ambientes protegidos y controlados, suministro de CO_2, solución nutritiva, luces artificiales, control de temperatura, humedad y movimiento del aire, y que son conocidos como "Agricultura Vertical", Agricultura Urbana o "Fábrica de Plantas con Luces Artificiales". Panamá, no cuenta con laboratorios para generar conocimientos con estos nuevos modelos de producción, por lo que el objetivo principal de esta investigación fue construir y probar una infraestructura tipo fábrica de plantas con luz artificial en las instalaciones del Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales. Dentro de los objetivos específicos se planificó realizar pruebas de germinación acumulado y crecimiento de lechuga romana y someter las plántulas a luces LED utilizando un prototipo de lámpara construido en el CEPIA y luces comerciales.**
El estudio cumplió con el objetivo de construir y probar el laboratorio en un área de 45 m^2. Se logró además establecer el porcentaje de germinación acumulada de la lechuga, el peso fresco de las plantas, número de hojas y el tiempo aproximado del ciclo del cultivo. Además, se logró probar de manera exitosa el prototipo de lámpara construido en el CEPIA y que contaba con tres espectros de luz LED, para el crecimiento de la lechuga romana.

***Palabras claves-** Lámpara, LED, lechuga, germinación, fábrica de plantas con luz artificial, PFAL.*

I. INTRODUCCION

Según Kozai, para el 2050 el 70% de la población vivirá en áreas urbanas [1]. Según el autor más y más personas se interesan en la agricultura urbana o granjas verticales. Para enfrentar la demanda creciente de alimentos, científicos de diversos países están promoviendo modelos innovadores de producción agrícola, situados en las áreas urbanas o en su periferia, que son conocidos como agricultura urbana, agricultura vertical en ambientes controlados o fábrica de plantas con luces artificiales. El término "fábrica de plantas con iluminación artificial (PFAL, por sus siglas en inglés)" se refiere a una instalación de producción de plantas con una estructura tipo almacén aislada térmicamente y casi hermética [1]. Múltiples estantes de cultivo con lámparas eléctricas en cada estante se apilan verticalmente en el interior. Otros equipos y dispositivos necesarios para un PFAL son acondicionadores de aire, ventiladores de circulación de aire,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00070

unidades de suministro de CO_2, solución de nutrientes, y una unidad de control ambiental. Apilar más estantes de cultivo verticalmente aumenta la eficiencia de la tierra usar [1]. En este modelo de producción se trabaja con menos agua, nutrientes, pesticidas y mano de obra. Se controla la iluminación, temperatura, humedad, agua, concentración de dióxido de carbono, etc., para crear un ambiente eficiente y artificial en un espacio cerrado [2]. Se considera que este modelo de producción agrícola permitirá la creación de nuevos nichos de mercado. Entre varios factores ambientales que afectan el rendimiento y calidad de los cultivos, la luz es un factor crucial [3]. En consecuencia, la mayoría de los procesos de desarrollo que ocurren a lo largo del ciclo de vida de las plantas dependen de la luz, incluyendo germinación de semillas, fototropismo, gravitropismo, movimiento de cloroplastos, evitación de sombra, ritmos circadianos e inducción de floración [4].

El foco de la investigación fue el desarrollo de un laboratorio para realizar investigaciones en el tema de agricultura en ambiente controlado, ya que Panamá no cuenta con infraestructuras de este tipo, específicamente en el modelo de producción tipo cerrado, cultivo hidropónico, luces artificiales LED y el uso de internet, conocido como Agricultura Vertical en Ambiente Controlado o "Plant Factory with Artificial Light (PFAL)".

Los objetivos del estudio fueron ejecutar pruebas para evaluar el funcionamiento de la cámara de cultivo, determinar el porcentaje de germinación acumulada de la lechuga romana y evaluar el crecimiento del cultivo en ambiente controlado bajo luces LED de lámparas comerciales y del prototipo diseñado en el CEPIA.

II. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA), ubicadas en el edificio C de la Universidad Tecnológica de Panamá, Campus de Investigación de la Extensión de Tocumen, en el periodo octubre 2017-diciembre de 2021.

A. Elaboración de planos del laboratorio y sus componentes

La Dirección de ingeniería y arquitectura de la UTP elaboró los planos del laboratorio y componentes en base al diseño realizado por el equipo técnico del proyecto (planta arquitectónica, eléctrico, plomería, aire acondicionado y suministro de CO_2).

B. Diseño de estantes de metal que contienen las bandejas de plástico

El equipo del proyecto diseñó los estantes de metal (345 cm x 76 cm y 50 cm entre bandejas) con 5 niveles para colocar 25 bandejas (66 cm x 45 cm x 6.5 cm) que contienen los paneles de cultivo. Ver figura 1.

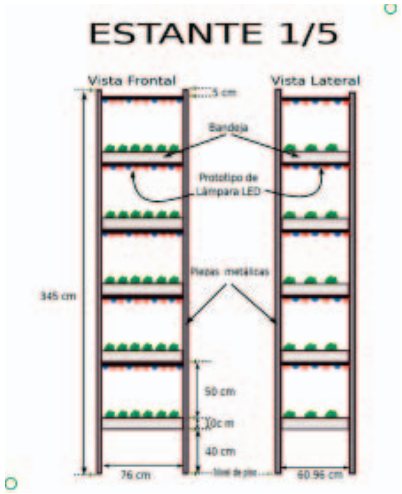


Fig. 1. Estantes de metal

C. Diseño del croquis de la cama de cultivo de foam

Se elaboraron dos diseños del croquis del panel de cultivo (60 cm x 39 cm x 2.3 cm) y la distribución espacial de los orificios donde serían sembradas las plántulas de lechuga (8 plantas por lámina) para la fase de crecimiento hasta la cosecha.

D. Diseño del croquis del sistema hidropónico

Se diseñó el croquis con el modelo de sistema hidropónico tipo "técnica del flujo profundo" o DFT por sus siglas en inglés (Fig. 2). El agua del grifo se trató con un esterilizador ultravioleta Aquatec Eco-Systems, antes de pasar a los tanques de preparación y almacenamiento de la solución nutritiva. Mediante bombas aQuatek de 0.5 HP se distribuyó la solución a las bandejas con un caudal de 2 litros/min. La solución retornaba por gravedad al tanque de almacenamiento y las bandejas colocadas en la parte inferior de los estantes se drenaban por una bomba. Las raíces de las plantas se mantenían con solución recirculante las 24 horas.

Fig. 2. Croquis del sistema hidropónico. 2021.

E. Materiales de cultivo y condiciones de crecimiento

En la tabla I se describe la línea de tiempo experimental y las condiciones de cultivo.

Para las pruebas de germinación se sembraron semillas de lechuga romana (*Lactuca sativa L.*) en sustrato hidropónico Oasis (2.2 cm x 2.2 cm x 3.8 cm) humedecidos con agua del grifo y colocados en contenedores de plástico 16 cm x 24.5 cm [5]. Los contenedores se cubrieron con plástico negro y se colocaron en un gabinete en sombra por tres días. La temperatura en el cuarto fue de 21 °C.

Para la fase de plántulas, se colocó la plancha de oasis con las semillas en proceso de germinación bajo la lámpara LED (prototipo). Se preparó la solución nutritiva 50% concentrada

y se humedeció la plancha de oasis con un aspersor cada día. Se monitoreo el porcentaje de germinación acumulada (GA) cada día. La temperatura se fijó en 21°C. La concentración de CO_2 se mantuvo a nivel del ambiente externo en la cámara de cultivo en las pruebas 1 y 2. Se colocaron las bandejas con el oasis bajo luz LED de lámparas artificiales (bandejas C-2 y E-2) en la tercera prueba.

Semillero-3 d	Plántula 12-15 días	Crecimiento-25 a 30 días	Cosecha (30-35 días) 45-48 dds
Semilla de lechuga romana Parris Island Sustrato: oasis En sombra por tres días T: 21 °C Agua del grifo Bandeja de plástico Plástico negro	Semillas en oasis Iluminación con luz LED del prototipo de lámpara construido en el proyecto. PPFD: 200 umol/m^2· s (pruebas 1 y 2). En la tercera prueba se utilizaron dos lámparas comerciales VIVOSUN VS1000. CE de solución nutritiva: 1 a 2.5 mS/cm^{-1} Fotoperíodo: 16 hrs/día pH: 5.5-6.5; HR: 60 CO_2: No suministrado en las pruebas 1 y 2. En la tercera prueba si se utilizó. T: 21-23 °C Riego a mano (con aspersor cada día se humedecen los alveolos con solución nutritiva) Solución nutritiva al 50%.	Trasplante día 15 – días después de siembra (dds) a camas de foam (60 x 39 cm), distancia 16 cm entre plantas (triángulo equilátero), 8 plantas/cama. Condiciones del experimento: Luces LED mixtas del prototipo diseñado se emplearon en las pruebas 1 y 2. PPFD: 200 umol/m^2 s^1. En la tercera prueba se emplearon dos lámparas LED comerciales. CE de solución nutritiva: 1 a 2.5 mS/cm^{-1} Fotoperíodo: 16 hrs/día pH: 5.5-6.5 HR: 60 CO_2: No se suministró en las pruebas 1 y 2. En la tercera prueba se agregó un promedio de 1,200 ppm T: 21-23 °C Uso de bombas de acuario para dotar de oxígeno a la solución Solución nutritiva: al 100%.	Peso fresco aproximado con raíz mínimo: 60 g. Peso fresco máximo promedio: 100 g

TABLA 1. LÍNEA DE TIEMPO EXPERIMENTAL, SEGÚN ETAPA FENOLÓGICA Y CONDICIONES DE CULTIVO. 2021.

F. Lámparas led

La luz fue medida con medidor Quantum SQ-500 de la marca Apogee y con el espectroradiómetro STS-VIS de la marca Ocean Optics.

En la primera prueba se utilizó la lámpara prototipo diseñada y ensamblada en el CEPIA. La densidad de flujo de fotones se midió al centro del contenedor, alcanzando 400 µmol/m2s. En las esquinas fue de 380 µmol/m2s.

En la segunda prueba también se empleó la lámpara prototipo fabricada en la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) con 180 leds del tipo COB de la marca LoHas Led de tres longitudes de onda que corresponden a los colores azul (445 nm), verde (525 nm) y rojo (660 nm).

En la fig. 3 se observa la distribución espectral del prototipo de lámpara LED construido en el CEPIA UTP.

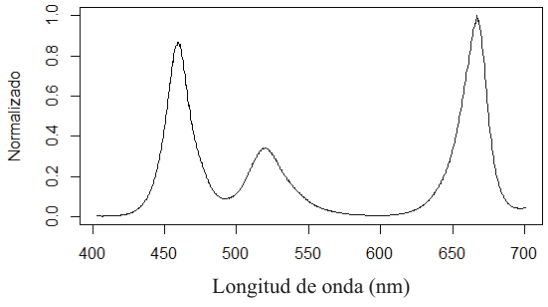


Fig. 3. Distribución espectral del prototipo de lámpara LED, medido con el espectroradiómetro STS.

En la tercera prueba se utilizó la lámpara de la marca VIVOSUN VS1000, con led azul (450 nm), led blanco (3000 K), led rojo (650 nm). En la figura 4 se observa el espectro.

G. Mediciones post-cosecha

Se midió altura y ancho de planta, peso fresco con y sin raíz, número de hojas, largo y ancho de hojas. Se realizó un arreglo de hojas en cartulina para toma de fotos que sería utilizado para el análisis foliar.

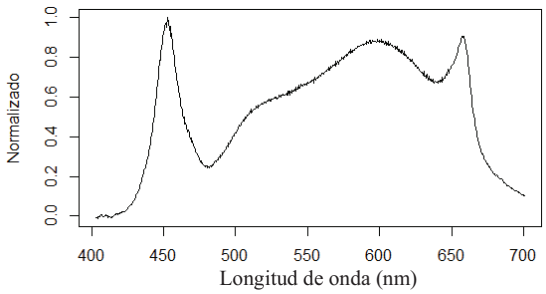


Fig. 4. Distribucion espectral normalizada de la lámpara VIVOSUN VS1000, medido con el espectroradiómetro.

H. Análisis

Mediante el uso de la estadística descriptiva, se estimó la media y desviación estándar de los datos. Se realizó el análisis de normalidad de Shapiro-Wilk para determinar si los datos proceden de una distribución normal.

Se compararon las medias mediante una prueba de t de student en los datos de peso, altura y ancho de planta de las pruebas dos y tres.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa RStudio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Planos

Se logró instalar el laboratorio de AAC tipo "Plant Factory" y áreas anexas de acuerdo con lo planificado por el equipo del proyecto. La cámara de cultivo contó con un área de 18 m^2, los cuartos de control y operación con 8 m^2 cada uno, el vestíbulo de la cámara de cultivo con 4 m^2 y la zona de visitantes con 7 m^2. Ver plano en figura 5 siguiente.

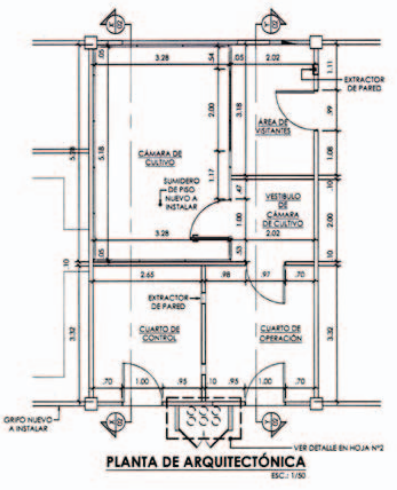


Fig. 5. Planta arquitectónica del laboratorio de AAC. 2021.

B. Croquis de la cama de cultivo

El diseño final de la cama de cultivo se aprecia en la Fig. 6 con una capacidad de 8 plantas en un área de 0.234 m^2.

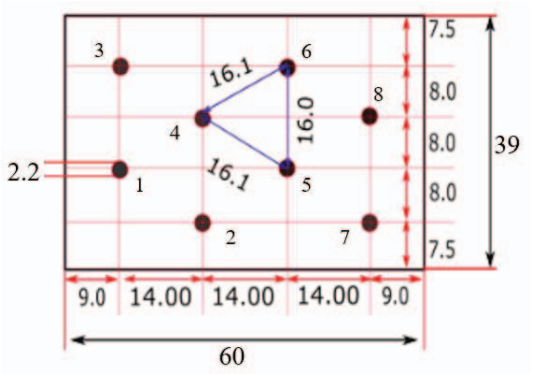


Fig. 6. Distribución espacial de las plantas de lechuga en el panel de cultivo de foam. 2021.

En la figura 7 se puede apreciar la cámara de cultivo y el crecimiento de lechuga durante las pruebas preliminares.

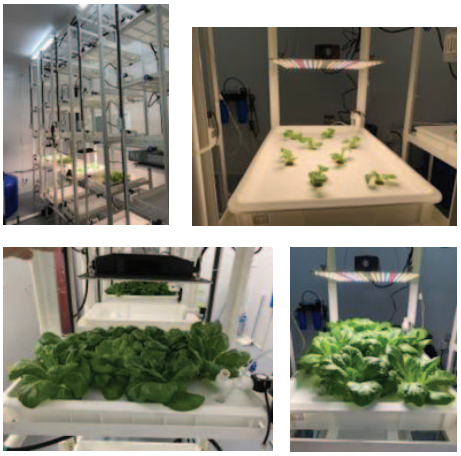


Fig. 7. Cámara de cultivo en fase de prueba.

B. Resultados de Germinación

Se realizaron tres pruebas de germinación y crecimiento de lechuga en los siguientes períodos:

- Prueba preliminar 1: agosto 10 a agosto 23 de 2021 (13 días)
- Prueba preliminar 2: agosto 25 a octubre 12 de 2021 (48 días)
- Prueba preliminar 3: noviembre 15 a diciembre 28 de 2021 (43 días)

Resultados de la prueba 1: Se logró un porcentaje de germinación de 62% al tercer día. Al sexto día fue de 68%, mientras que al octavo día subió a 80%. Ver plántulas con 13 dds, 9 días con luz LED en la fig. 8.

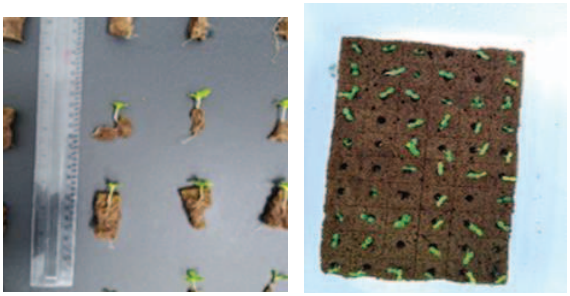


Fig. 8. Plántulas de lechuga bajo luz LED con 13 dds. 2021.

Se pudo observar que los tallos de las plantas recién germinadas se etiolizan y vuelven quebradizos si no reciben luz.

En los resultados de prueba 2 y 3, de acuerdo con las pruebas realizadas, la germinación de la lechuga romana Parris Island toma varios días y se estabiliza en el día 9 (ver Fig. 9) alcanzando su punto máximo entre 80 y 85 porciento.

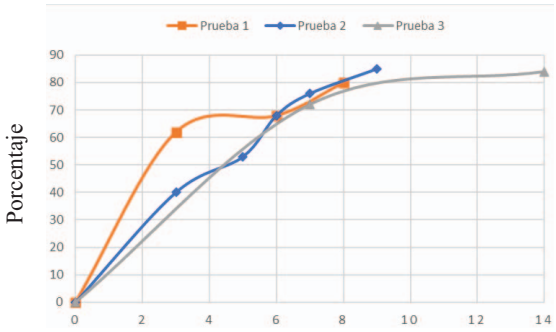


Fig. 9. Germinación acumulada.

C. *Resultados de Crecimiento*

Se utilizaron las pruebas 2 y 3 para la evaluación del crecimiento.

En la figura 10 se aprecia el trasplante de la lechuga a la cama de cultivo.

Fig. 10. Trasplante de plántulas a bandeja el 8-9-2021, prueba 2.

Las lecturas de la PPFD tomadas a las plantas el 8 de septiembre, día del trasplante, se aprecian en la tabla 2. También se observan las mediciones de la PPFD de las luces LED en distintos puntos de la cama de cultivo.

TABLA 2. LECTURAS DE LA PPFD DURANTE EL TRASPLANTE. SEPTIEMBRE 8, 2001 y LECTURAS DE LA PPFD DE LUCES COMERCIALES. NOVIEMBRE 19. 2021.

Posición	Prueba 2	Prueba 3
1	176	97.3
2	208	204
3	194	88.65
4	184	149
5	183	187
6	204	183
7	195	102
8	171	119

En la figura 11 se observa la lechuga de la prueba 2 a los 48 días de sembrada.

Fig. 11. Lechuga romana a la cosecha, 48 días después de sembrada, prueba 2. 2021.

En la figura 12, se muestran imágenes de la lechuga al momento de la cosecha, prueba 3 (28 de diciembre de 2021) de las bandejas C2 y E2.

C2 E2

Fig. 12. Bandeja C2 y E2 al momento de la cosecha (28 diciembre 2021).

Las plantas de la prueba 3 que obtuvieron el mayor peso promedio fresco con raíz fueron las ubicadas en las posiciones (en orden descendente) 5, 4 y 6. Ver tabla 3 siguiente.

TABLA 3. PESO FRESCO DE PLANTAS POR BANDEJA, SEGÚN POSICION. PRUEBA 3, 43 DÍAS DESPUÉS DE SEMBRADA, 2021.

Posición	Bandeja C2 (g)	Bandeja E2 (g)	Promedio (g)
1	66	69	67.5
2	60	60	60
3	83	73	78
4	93	98	95.5
5	108	116	112
6	82	77	79.5
7	65	66	65.5
8	72	72	72

En la tabla 4 se resume el peso fresco promedio de la lechuga en las pruebas 2 y 3, según la posición indicada en la figura 6 de la distribución de las plantas en la cama de cultivo.

TABLA 4. PESO FRESCO PROMEDIO DE LAS PLANTAS, SEGÚN POSICIÓN Y PRUEBA. 2021.

En la figura 13 se observa que en la prueba 2 el peso promedio por planta fue de 74.3 g, 48 días después de sembrada y en la prueba 3, el peso promedio de cada planta fluctuó entre 60 g a 112 g con un promedio total de 79 g/planta.

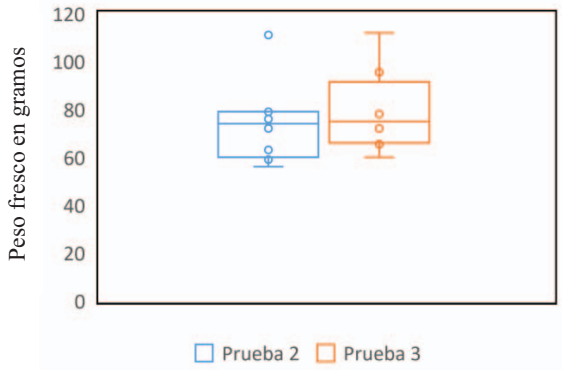


Fig. 13. Peso fresco de la lechuga sin raíz de las pruebas 2 y 3.

En la figura 14 se observa el valor medio de la altura de las plantas para las pruebas 2 y 3 que corresponden a 16.31cm con desviación estándar de 1.59 y 15.68 cm con desviación estándar de 1.62 respectivamente.

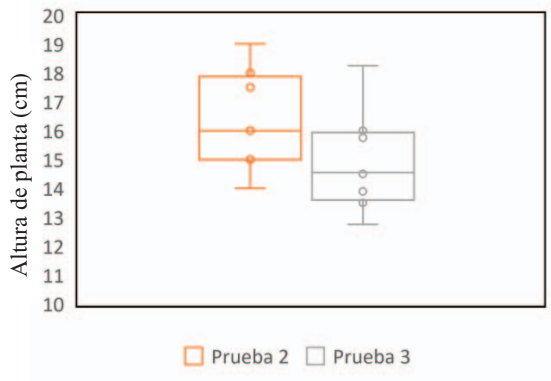
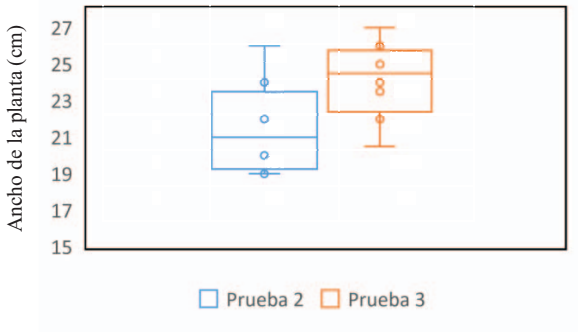


Fig. 14. Altura de las plantas centímetros de las pruebas 2 y 3.

En la figura 15 se observa el valor medio del ancho de

Posición de la planta	Prueba 2 48 dds (g)	Prueba 3 43 dds (g)
1	72	67.5
2	63	60



las plantas para las pruebas 2 y 3, corresponden a 21.5 cm con desviación estándar de 2.34 y 24.46 cm con desviación estándar de 1.60 respectivamente.

Fig. 15. Ancho promedio de las plantas de las pruebas 2 y 3.

D. Prueba de normalidad

En la tabla siguiente se observa que dado que las p son mayores que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

TABLA 5. PRUEBA DE NORMALIDAD DE SHAPIRO-WILK.

Variable	Prueba	W	P
Peso fresco	2	0.86718	0.1414
Peso fresco	3	0.90242	0.3038
Altura de planta	2	0.95099	0.7212
Altura de planta	3	0.94279	0.6387
Ancho de planta	2	0.89636	0.2679
Ancho de planta	3	0.88575	0.2135

E. Comparación de medias con t test

Aunque la distribución de los datos se puede aproximar a una normal debido a que se tiene menos de 30 grados de libertad es posible utilizar una prueba de t de student para determinar si las medias son diferentes con p=0.05

Para el caso de las medias de los pesos se obtuvo t =-0.5062, df = 14, p-value = 0.6206. Lo que indica que no se observa diferencia significativa.

Para el caso de las medias de las alturas de las plantas se obtuvo t = 1.6344, df = 13.998, p-value = 0.1245, esto indica que no se observa diferencia significativa.

En el caso de las medias del ancho de la planta se obtuvo

t = -2.7651, df = 12.369, p-value = 0.01671, lo que indica que si hay una diferencia significativa.

F. Discusión

En los resultados de la prueba de germinación acumulada fue 85%. De acuerdo con Nunomura, el porcentaje óptimo de germinación debe ser 98% o superior [6]. Este porcentaje es inferior a lo esperado y puede deberse a diversos factores tales como tiempo de almacenamiento de la semilla,

temperatura, perdida de sustancias nutritivas del material genético, entre otros.

En la prueba 2 se observó que las plantas se fueron aproximando durante su crecimiento lo que sugiere que la densidad de siembra utilizada en estas pruebas (8 plantas por bandeja) puede ser reducida a 6 plantas. Sería conveniente incorporar la variable densidad de siembra en próximos ensayos que se realicen en el laboratorio de ambiente controlado del CEPIA.

Los rendimientos obtenidos en las pruebas preliminares realizados en el CEPIA son inferiores a los informados en la literatura revisada, Saengtharatip [7] reportó pesos de lechuga bajo 7 tipos de luces LED blancas con una PPFD de 200 umol/m^2.s que fluctuaron entre 43 a 85 g, 35 días después de sembrada. Lin, K-H et al [8], encontró en lechugas cosechadas a los 35 días un peso de 164 g, sometidas a luces LED RBW. En este caso el hecho puede ser explicado por la falta de suministro de CO_2 en la cámara de cultivo.

En la etapa de crecimiento se notó un traslape de las hojas de lechuga lo que puedo ocasionar el amarillamiento de las hojas inferiores externas lo que reduciría la parte comercializable del cultivo. De acuerdo con el Dr. Satoru Tsukagoshi, de la Universidad de Chiba en Japón [9], "la densidad de siembra de 16 cm de distancia puede ser un poco estrecha. En este caso, el sombreado entre sí empeora la condición de luz. Luego, las plantas internas tienden a hacer hojas débiles y largas al sombreado y las plantas externas hacen hojas gruesas y cortas. Esta puede ser la razón de un crecimiento poco uniforme. El experto recomienda que se debiera examinar una menor densidad de siembra para obtener más crecimiento y uniformidad".

Se confirma en la tabla 4 que las plantas ubicadas cerca del centro del panel reciben una mayor intensidad de luz que la de los bordes, hecho que origina una mayor fotosíntesis y biomasa en esta área. Las plantas localizadas en las posiciones 4, 5 y 6 fueron las que obtuvieron mayor peso en ambas pruebas, hecho que pudiera implicar una falta de uniformidad en la luz que le llega al cultivo. Sobre este tema, Saengtharatip [7], sugiere aplicar luz suplementaria desde distintas direcciones (por ejemplo, de abajo hacia arriba) para obtener una mayor biomasa.

En base a los resultados de las pruebas preliminares, el no suministro de CO_2 ocasionó el lento crecimiento de las plantas hecho que reduce su rendimiento y puede alargar el ciclo de vida.

En cuanto a las comparaciones de las medias se pudo notar que el nivel de variabilidad no pudo hacer posible una distinción significativa de los pesos, ni en el alto de la planta.

La altura promedio de las plantas en los dos ensayos difirieron en menos de un centímetro los cual es una distancia pequeña.

En el caso del ancho de la planta si hubo diferencia debido a que la varianza fue más pequeña.

IV. Conclusiones

Se cumplió con el objetivo de construir y probar el laboratorio de agricultura en ambiente controlado, tipo "Fábrica de Plantas" en el CEPIA, ubicado en el Campus de Investigación de la Extensión de Tocumen, en un área de 45 m^2.

En las pruebas preliminares realizadas en la cámara de cultivo, se logró establecer que el porcentaje de germinación acumulada de la lechuga Parris Island fue de 85% en promedio.

Las plantas ubicadas en el centro de la cama de cultivo recibieron una mayor intensidad de luz LED que las ubicadas en los bordes, lo que se presume ocasionó más fotosíntesis, un mayor número de hojas y un mayor peso a la cosecha.

V. Recomendaciones

Continuar las pruebas con el prototipo de lámpara LED con distintos vegetales de hoja para observar el comportamiento del crecimiento en las fases de semillero y plántula con distintos espectros de luz.

Continuar con el equipamiento y automatización de la cámara de cultivo para un monitoreo y control más preciso de las variables ambientales que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Con el fin de lograr una mayor uniformidad en la intensidad de luz que les llega a las plantas de lechuga, expertos de la Universidad de Chiba recomendaron colocar láminas o cartulinas blancas, desde la parte superior donde se encuentra la lámpara y hasta 13 cm aproximadamente hacia abajo de manera tal que cubra unos cm más del nivel donde se encuentra la lámpara. Se debería dejar un espacio para que el aire pueda moverse en la cama de siembra y alrededor de las plantas.

VI. Agradecimientos

A la empresa Urban Farms por su contribución con algunos insumos de producción. A los estudiantes de las facultades de Ing. Eléctrica, Ing. Mecánica, Ing. Industrial, Ing. de Alimentos y al Centro Regional Universitario de la UTP de Coclé por los trabajos realizados durante la fabricación del prototipo de lámpara LED, adecuación de la cámara de cultivo, labores de cosecha y extracción de muestras.

VII. Referencias

[1] Kozai, T, Niu, G., Takagaki, M. Plant Factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. 2016a. Elsevier. p 405.

[2] Dong, Chen, et al. Evaluation of Wheat Growth, Morphological Characteristics, Biomass Yield and Quality in Lunar Palace-1, Plant Factory, Green House and Field Systems. 2015. Acta Astronautica 111 (2015): 102-109. W.

[3] Son, Ki-Ho and Oh, Myung-Min. 2013. Leaf Shape, Growth, and Antioxidant Phenolic Compounds of Two Lettuce Cultivars Grown under Various Combinations of Blue and Red Light-emitting Diodes. HortScience.

[4] Carvalho, et al, 2011; Jiao, et al, 2007. Citado en Shape, Growth, and Antioxidant Phenolic Compounds of Two Lettuce Cultivars Grown under Various Combinations of Blue and Red Light-emitting Diodes. HortScience. 2013.

[5] Oasis easy plant. Sustratos hidropónicos marca OASIS® - Hortalizas. 2015.

[6] Nunomura, O., et al, 2016. Seeding, seedling production and transplantin. In Plant Factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Capítulo 18. 2016. Elsevier, pp. 223-235.

[7] Saengtharatip, S. 2018. Prospect of LED lighting sources to enhance lettuce quality and productivity in plant factory. Graduate School of Horticulture, Chiba University. Doctoral thesis. 100 p. HAA_0072.pdf (chiba-u.jp).

[8] Lin, K-H, Huang, M-Y, Huan, W-D, Hsu, M-H, Yang, Z-W. 2012. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa L. var. capitata*). Scientia Horticultura 150 (2013) 86-91. ELSEVIER.

[9] Tsukagoshi, S. Octubre de 2021. Universidad de Chiba en Japón (Entrevistado por Victor Guillén

Effect of the type of fermenter on the cocoa fermentation process and quality of the cacao beans

Efecto del tipo de fermentador en el proceso de fermentación del cacao y en la calidad del grano obtenido

Darla Calderon
CINEMI
Universidad Tecnológica de Panamá (UTP)
Panamá, Panamá
darla.calderon@utp.ac.pa

Wedleys Tejedor
CEPIA
Universidad Tecnológica de Panamá (UTP)
Panamá, Panamá
wedleys.tejedor@utp.ac.pa

Orlando Melgar
CINEMI
Universidad Tecnológica de Panamá (UTP)
Panamá, Panamá
orlando.melgar@utp.ac.pa

Abelardo Franco
SIPE
Centro Regional Universitario de Bocas del Toro, UTP
Bocas del Toro, Panamá
abelardo.franco@utp.ac.pa

***Abstract*— The aim of this work is to investigate the effect of the type of fermenter on the fermentation process and quality of the cocoa beans. For this purpose, two prototype fermenters were used, a wooden rotary fermenter and a stainless steel rotary fermenter, and were compared with a traditional wooden box fermenter. The product was fermented for 7 days, the temperature of the fermenting mass, pH, titratable acidity, moisture, fermentation index of the cotyledons, soluble solids of the mucilage and sensory attributes by means of focus groups on cocoa liquors; were monitored for each fermenter. The results obtained showed significant differences ($p<0.05$) in the average daily temperature in the box fermenter compared to the averages of the rotary wood and stainless steel fermenters. As for pH, titratable acidity, moisture, soluble solids and fermentation index, no significant differences were found by type of fermenter. The sensory assessment determined that the cocoa liquor from the box fermenter had more pleasant sensory qualities than the other two. In conclusion, this work suggests that the material, shape, type of agitation and size of the fermenter have an effect on the temperature, which means that the type of fermenter conditions the temperature reached by the fermenting mass.**

***Keywords*— Fermentation index, physical-chemical quality, rotary fermenter, stainless steel, Theobroma cacao L.**

***Resumen* — El objetivo de este trabajo es investigar el efecto del tipo de fermentador en el proceso de fermentación del cacao y en la calidad del grano obtenido. Para ello se utilizaron dos prototipos de fermentadores, uno rotatorio de madera y otro rotatorio de acero inoxidable y se compararon con un fermentador tradicional de caja de madera. Se fermentó el producto durante 7 días y se monitoreó diariamente la temperatura de la masa fermentante, el pH, la acidez titulable, la humedad y el índice de fermentación de los cotiledones, los sólidos solubles del mucílago y una evaluación sensorial mediante grupos focales en licores de cacao para cada fermentador. Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) en la temperatura media diaria alcanzada por el fermentador de caja en comparación con las medias de los fermentadores rotatorios de madera y acero inoxidable. En cuanto el pH, acidez titulable, humedad, sólidos solubles e índice de fermentación no se encontraron diferencias significativas por tipo de fermentador. La evaluación sensorial determinó que el licor de cacao proveniente del fermentador de caja obtuvo cualidades sensorial más agradables que los otros dos. Como conclusión en este trabajo se sugiere que el material, forma, tipo de agitación y tamaño del fermentador tienen un efecto en la temperatura, es decir que el tipo de fermentador condiciona la temperatura alcanzada por la masa fermentante.**

***Palabras claves* —Acero inoxidable, calidad fisicoquímica, fermentador rotatorio, índice de fermentación, Theobroma cacao L.**

I. Introducción

Los granos de cacao son la materia prima en la producción del chocolate. Según se reporta, la producción mundial de cacao en el 2019/2020 fue de 4 735 000 toneladas de granos secos, donde África es el responsable de aportar el 74.9% [1]. Este constituye uno de los productos de la agroindustria de mayor aporte en el mercado internacional, debido al alto valor agregado creado por la industria chocolatera [2]. De modo que se identifica al cacao como un producto de gran valor en la economía.

El cacao fresco posee un sabor amargo, astringente y desagradable [3], por lo que se procesa (fermentación, secado y tostado) para adecuarlo y obtener ciertas características deseadas. La fermentación del cacao es un paso crítico en la postcosecha, puesto que gracias a este proceso, el mucílago que rodea el grano se remueve, se da la muerte del embrión, se desarrolla el color, se reduce la astringencia y el amargor en los cotiledones y se producen los precursores del sabor y el aroma del chocolate [4].

La fermentación es espontánea, es decir se inocula con los microorganismos del ambiente al abrir las mazorcas de cacao. Inicialmente tiene lugar en la pulpa mucilaginosa, debido a que este es un medio rico para el crecimiento de microorganismos, por lo que a este proceso se le denomina

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00071

fermentación externa, mientras que la fermentación interna se refiere a reacciones enzimáticas y químicas en los cotiledones [5].

Durante la primera fase de fermentación, las levaduras transforman los hidratos de carbono de la pulpa en etanol, la segunda fase inicia con la aeración de la masa fermentante que permite el desarrollo de las bacterias ácido acéticas y ácido lácticas, que elaboran ácido acético como producto de la oxidación del etanol y ácido láctico a partir de la glucosa restante. Tanto el etanol como el ácido acético penetran al cotiledón por difusión y en conjunto con las altas temperaturas causan la muerte del embrión, de modo que se desencadenan una serie de reacciones bioquímicas endógenas que producen los precursores del sabor a chocolate [6].

Existen varios métodos de fermentación y su aplicación depende de las costumbres y prácticas de cada lugar. Algunos de los métodos más conocidos son en sacos, montones y en cajas de madera. No obstante, estos métodos presentan algunas desventajas como la dificultad para realizar las remociones y la pérdida de calor, que resultan en granos de calidad heterogénea. También en la práctica el final de la fermentación se determina según el criterio del productor, al observar el color y aspecto de los granos de cacao y habitualmente no se monitorean parámetros durante el proceso.

Es por esta razón que los fermentadores rotatorios pueden ser una alternativa a los métodos tradicionales, puesto que, se espera que con un simple movimiento de palanca los granos de cacao se volteen de manera homogénea, por tanto se asegura una buena aireación y no se pierde el calor al tener que retirar la masa de los fermentadores. Además, al monitorear algunos parámetros como temperatura, pH, acidez, sólidos solubles, etc; también pueden ayudar a entender mejor lo que sucede durante el proceso de fermentación y a la vez tomar acciones para evitar problemas durante dicho proceso.

El objetivo de este trabajo es investigar el efecto del tipo de fermentador en el proceso de fermentación del cacao y en la calidad del grano obtenido.

II. Materiales y métodos

A. Lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Cooperativa de Servicios Múltiples Solary R.L. ubicada en la comunidad de Cilico Creek, en el corregimiento de Tuwai, distrito de Jirondai, Región Ñokribo de la Comarca Ngäbe Buglé. La comunidad se ubica entre las coordenadas 9°03'30" norte y 82°18'06" oeste. La provincia se caracteriza por tener un clima tropical lluvioso y según los últimos datos del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) posee una temperatura media anual de 27°C y precipitaciones anuales de alrededor de 4 808.1 mm [7].

B. Materia prima

Para este estudio se utilizaron 600 mazorcas, completamente maduras de cacao (*Theobroma cacao L.*), que fueron cosechadas dos días antes del proceso de fermentación, por los productores miembros de la Cooperativa, siguiendo sus prácticas tradicionales de cosecha. La apertura de los frutos se realizó mediante un corte transversal utilizando machetes, previamente desinfectados. Los granos frescos de cacao se seleccionaron según su aspecto, separando los sanos y maduros de los inmaduros, sobremaduros, germinados, enfermos o dañados. Los granos sanos se pesaron e inmediatamente fueron transferidos a los fermentadores.

C. Fermentación de los granos de cacao

La fermentación se llevó a cabo en la misma Cooperativa y se emplearon tres prototipos diferentes. Uno de estos fue un fermentador rotatorio de madera de laurel, cuya forma cilíndrica posee un diámetro de 41 cm, 70 cm de longitud y una capacidad aproximada de fermentar 132 Kg de cacao en baba. El otro fue un fermentador rotatorio de acero inoxidable de forma semicilíndrica con un diámetro de 34.5 cm, una longitud de 49.4 cm y una capacidad aproximada de fermentar 50 Kg. El tercer fermentador fue un cajón de madera de laurel cuyas dimensiones son 60 x 60 x 50 cm y una capacidad aproximada de fermentar 162 Kg de cacao en baba. Los fermentadores se limpiaron antes de ser llenados con los granos de cacao y en cada uno de ellos, se colocaron 27 Kg de cacao en baba y se cubrieron con sacos de polipropileno limpios. La remoción y los volteos de los granos se llevaron a cabo a partir de las 48 h y efectuándose cada 24 h, para iniciar este proceso, los sensores de temperatura se retiraron temporalmente para facilitar dicha actividad. En el caso del cajón de madera la remoción se realizó con una pala durante 10 min hasta obtener un mezclado homogéneo de los granos, en cuanto a los fermentadores rotatorios, los volteos se efectuaron utilizando las palancas manuales de cada una de los dispositivos durante 10 min. El tiempo total de fermentación fue de 7 días.
Para facilitar la identificación de los fermentadores se utilizó la siguiente simbología para los prototipos: FA, para el fermentador rotatorio de acero inoxidable, FB, para el fermentador rotatorio de madera y FC, para el fermentador de cajón. Tal y como se observa en la figura 1.

Fig. 1. Diferentes prototipos de fermentadores utilizados en la investigación.

D. Monitoreo de la temperatura

El registro de temperatura del cacao en baba fue realizado mediante el uso de sensores de sonda (marca FLUKE modelo 80PK-22) y termopares (marca BULUSHI modelo 88598), en cada fermentador se colocaron dos sensores de cada tipo, uno de ellos a la mitad y el otro en la parte superior de la masa fermentante. La temperatura se registró en un datalogger (marca FLUKE modelo 88598). El intervalo de medición y

de registro de datos se hizo cada 5 min durante los siete días de fermentación.

E. Muestreo

Se recolectó, de manera aleatoria, aproximadamente 0.100 Kg de cacao por triplicado de cada fermentador cada 24 h, los granos se colocaron en bolsas de polipropileno y se refrigeraron y analizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Suelos del Centro Regional de la Universidad Tecnológica de Panamá en Bocas del Toros.

F. Medición de pH, sólidos solubles, acidez titulable y humedad

A partir de las muestras seleccionadas, se midió el pH de los cotiledones cada 24 h de acuerdo con el procedimiento establecido [8]. Se mezclaron 5g de cacao fresco, molido y sin testa con 100 mL de agua destilada a 60 °C, el homogeneizado se filtró y se enfrió inmediatamente por debajo de los 25 °C; se tomó un alícuota de 25 mL y con un medidor digital de pH marca (Milwaukee modelo MW-802), se determinó el pH por triplicado. La acidez titulable fue reportada como mmol de hidróxido de sodio por cada 100 g de cacao, según lo descrito por [9], para este procedimiento se valoró una alícuota de 25 mL hasta un punto final de pH de 8,1 con NaOH al 0,1N, por triplicado. Los sólidos solubles se determinaron por triplicado según el procedimiento descrito por [10], en este método se mezclaron 2g del mucílago macerado con 20 mL de agua destilada, de la mezcla obtenida se tomó 1 mL y se colocó en el prisma de un refractómetro marca (ATAGO modelo N-2). La humedad de los granos frescos se determinó los días 0, 2, 4 y 6 de fermentación por triplicado, para ello se tomaron 2g de cacao de cada muestra, se molieron y se midió la humedad en una balanza de humedad marca (Mettler Toledomodelo HB43 Halogen).

G. Índice de fermentación

Se tomaron 20g de cacao, a partir de las muestras correspondientes a los días 0, 3 y 7 de fermentación y se secaron en un horno de convección marca (Shellab modelo SGO6E) a 45°C durante 24h. Posteriormente las submuestras se molieron y se desengrasaron mediante el método Soxhlet con éter de petróleo. El índice de fermentación se determinó de acuerdo con el procedimiento descrito por [11]. En este se tomó 0.3g de la muestra molida y desengrasada y se agregó 30mL de metanol-ácido clorhídrico (97:3 v/v), se agitó, luego se dejó en refrigeración (5-8°C) durante 19h y se filtró. Posteriormente se midió la absorbancia de las muestras en un espectrofotómetro (UV-VIS RATIO BEAM HALO RB-10) a 460 nm y 530 nm. El índice de fermentación (FI) de las muestras se obtuvo calculando la relación de la absorbancia a 460nm y 530nm (FI =A460/A530).

H. Evaluación mediante grupos focales

Con el fin de determinar la calidad de los granos fermentados, se realizó un análisis sensorial mediante grupos focales. En el proceso se prepararon los licores de cacao, según el procedimiento descrito por [12]. Para ello, los granos fermentados y secos, se tostaron en un rango de temperatura de 110 a 120°C, se descascarillaron manualmente, se molieron y envasaron.

Para el análisis sensorial las muestras se colocaron en vasos codificados con una combinación aleatoria de números y se calentaron en baño maría a 50°C antes de servirlas.

Se realizó una descripción mediante la metodología de entrevistas de grupos focales (FG), en el cual un panel de nueve expertos valoró de manera cuantitativa la intensidad del olor, aroma y sabor del cacao, la acidez, el amargor, la astringencia y defectos presentes.

I. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), utilizando (Microsoft Excel Plus 2016) y posteriormente se realizó una prueba estadística de Diferencia Mínima Significativa (DMS) en el software estadístico SPSS.

III. Resultados y Discusión

A. Evolución de la temperatura durante la fermentación

En la fermentación del cacao, la temperatura juega un rol relevante debido a que la mayoría de cambios que ocurren en este proceso se promueven por la elevación de la misma [13]. La medición de este parámetro es de gran utilidad para identificar las diferentes fases de la fermentación y la capacidad del material del prototipo para conservar la temperatura.

Al analizar las temperaturas registradas, tal y como se observa en la Figura 2, se tiene que inicialmente los tres prototipos registraron la misma temperatura (28°C), luego de 24h, aumenta entre 2 °C y 4 °C hasta los 30 a 32 °C. En las siguientes 48h las temperaturas de FB y FC se mantienen constantes a aproximadamente 34°C, este leve aumento ocurre debido a la acción de las levaduras durante la fase anaerobia del proceso. En esta fase se obtiene como producto principal etanol a partir de carbohidratos, específicamente glucosa del mucílago que rodea al grano de cacao. Estos resultados concuerdan con lo expresado por otros autores, quienes manifiestan que, esta reacción exotérmica causa un incremento de la temperatura de la masa fermentante de 25-30°C a 34-40°C dentro de 48 h [14].

No obstante, en la misma figura, este aumento no se observa en FA, que mantiene una temperatura constante de 30°C durante el día 1 y 2 de la fermentación, por lo que se infiere que el inicio de la fermentación es más lento en este fermentador.

A partir del día 2 se inicia con las remociones y volteos de los granos de cacao, provocando que el comportamiento de la temperatura en los fermentadores aumente gradualmente, en esta fase aerobia del proceso las bacterias acéticas oxidan el etanol en ácido acético. Esta reacción exotérmica provoca un incremento de la temperatura de 25-30°C a 45-50°C.

Los descensos abruptos que se observan en la figura 2, registran precisamente los cambios de temperatura después de las remociones y volteos de los granos de cacao, así como los incrementos en esta tras este proceso de mezclado. Entre los días 2 y 3 de la fermentación, FC alcanza una mayor temperatura, seguido de FB y FA con 43.5, 41.6 y 38.6°C respectivamente. Se sigue observando como en FA la fermentación es tardía y en consecuencia la temperatura es menor.

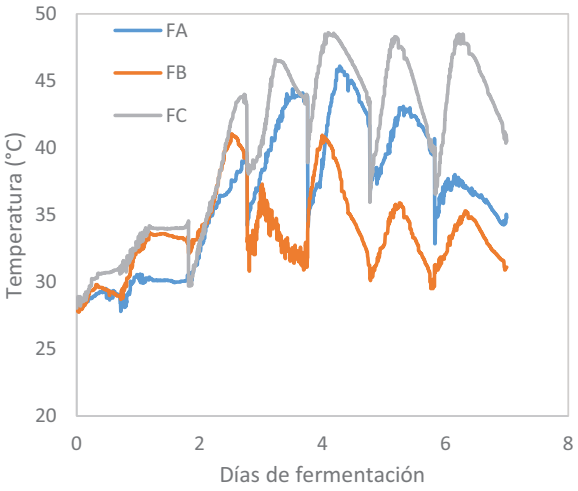
Durante los días 3 y 4, FB inicia con un declive acelerado en su temperatura en comparación con los otros dos fermentadores, esto podría indicar un volteo inadecuado de los

granos. Los volteos de la masa fermentante son importantes para airear, esto beneficia la fermentación logrando uniformidad y una distribución homogénea de la temperatura [13].

En general, la tendencia de la gráfica en la figura 2 muestra, que una vez alcanzadas las temperaturas más altas durante el día, en la fase aerobia del proceso, específicamente del día 2 al 7, se produce una caída gradual de la misma.

Según el análisis estadístico, hay diferencias significativas ($P < 0.05$) en los valores medios de la temperatura diaria, la temperatura media de FC difiere de las medias de FA y FB. Esto puede deberse a que, en este estudio, la temperatura se vio afectada por el tamaño, los materiales y la forma de agitación de los prototipos, tal y como se observa en la figura 1.

Los datos registrados muestras que la temperatura en FA osciló entre 27.8 a 46.1°C, durante los 7 días de fermentación observados. Para FB se observa que la temperatura estuvo entre 27.75 a 41.05°C, mientras que para FC el rango estuvo



entre 28.05 a 48.6°C, siendo este el prototipo que alcanzó la mayor temperatura. Estos rangos de temperatura son similares a los reportados por [15], [16] y [13] para el fermentador rotatorio de acero, fermentador rotatorio de madera y fermentador de cajón, respectivamente.

Fig. 2. Evolución de la temperatura de la masa fermentante en los tres prototipos durante el proceso de fermentación del cacao. FA: Fermentador rotatorio de acero inoxidable. FB: Fermentador rotatorio de madera. FC: Fermentador de cajón de madera.

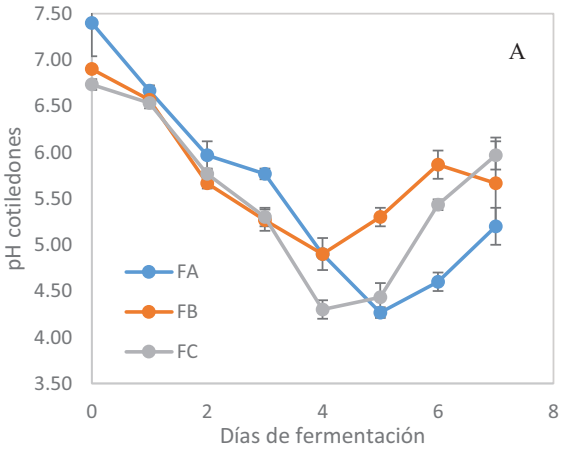
B. Evolución del pH y acidez en la fermentación

Como se mencionó anteriormente, durante la fase anaerobia de la fermentación (48 h), las levaduras son los microorganismos dominantes y producen etanol, durante la segunda fase cuando aumenta la aireación, el etanol se transforma en ácidos orgánicos (acético y láctico) por acción de las bacterias ácido lácticas y ácido acéticas que pasan a ser la población dominante en la fermentación [17]; este fenómeno se refleja en el comportamiento de las gráficas de la Figura 3. En ellas se observa una disminución gradual del pH a causa de la infiltración del ácido acético al interior de los granos, lo cual provoca cambios en el pH que podría descender de 6.4 a 4.5 según [18]. De manera que el pH es un parámetro de gran utilidad para controlar el proceso de fermentación en el cacao y establecer el tiempo necesario para alcanzar características deseables en el producto, tal y como lo sugiere [19].

El valor de pH más bajo y la acidez más alta medidos en los cotiledones para FA fue de 4.27 y 0.66 mmol NaOH/100g respectivamente, ambos datos se registraron durante el quinto día de fermentación. En los fermentadores FB y FC los valores de pH más bajos y acidez más alta se midieron el cuarto día, por lo que se observa como en el fermentador rotatorio de acero inoxidable el proceso de fermentación es más lento. Para FB se registró un pH de 4.9 y acidez de 0.34 mmol NaOH/100g, mientras que, para FC, el pH y la acidez medida fue de 4.3 y 0.65 mmol NaOH/100g respectivamente. Cuando se alcanza el pH más bajo la tendencia habitual es que empiece a aumentar de nuevo, debido a que, aunque las bacterias sigan produciendo ácido acético y láctico, los ácidos orgánicos empiezan a volatilizarse en los volteos finales.

De lo anterior, se observa que en FA el pH de los cotiledones pasa de 7.4 ± 0.36 a 5.20 ± 0.20, mientras que la acidez aumenta de 0.05 ± 0.04 a 0.39 ± 0.04 mmoles NaOH/100g. Para FB, el pH disminuye de 6.9 ± 0.01 a 5.67 ± 0.50 y paralelamente la acidez aumenta de 0.05 ± 0.01 a 0.31 ± 0.10 mmoles NaOH/100g y finalmente en FC el pH descendió de 6.73 ± 0.06 a 5.97 ± 0.15 y la acidez aumentó de 0.05 ± 0.01 a 0.37 ± 0.03 mmoles NaOH/100g. Al analizar los datos, no se encuentran diferencias significativas ($P < 0.05$) en los valores medios de pH y acidez medidos en los cotiledones de cada fermentador. De este modo, se puede inferir que el tipo de fermentador en este caso no influye en el pH y acidez obtenidos durante el proceso. Al analizar la Figura 3, se puede observar en general un aumento progresivo de la acidez y un descenso en el pH tal y como lo plantea [9].

El pH final que se obtiene después de la fermentación de los granos es de gran importancia, ya que el aroma y los precursores del sabor, son productos de una proteólisis enzimática que se origina por cambios en el pH. El autor [19] menciona que el pH mínimo para que se dé la actividad enzimática durante la fermentación debe ser 5.2, por lo que, en este caso, en los tres fermentadores, el cacao alcanzó este valor requerido. No obstante, [20] establece que el rango de pH óptimo final para el cacao fermentado debe ser de 5.6 a 6.57, de modo que solamente los granos provenientes de FB y FC lo alcanzaron.



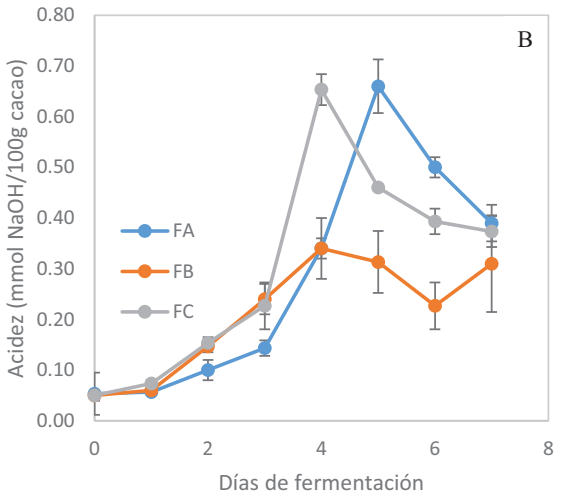


Fig. 3. A. Comportamiento del pH en los cotiledones de tres fermentadores a largo del proceso. B. Evolución de la acidez durante la fermentación. FA: Fermentador rotatorio de acero inoxidable. FB: Fermentador rotatorio de madera. FC: Fermentador de cajón de madera.

C. Comportamiento de los sólidos solubles

El contenido de azúcares es clave para que ocurra el proceso de fermentación, ya que las levaduras durante la primera fase utilizan este nutriente como sustrato y lo transforman en etanol, una forma de medir este parámetro es mediante el contenido de sólidos solubles [16].

Al analizar el comportamiento de los °Brix en la pulpa mucilaginosa que rodea el grano del cacao, caracterizada por su alto contenido de azúcar de alrededor de 9 a 13% (m/m) [5], se observa en la figura 4 que en los primeros dos días de fermentación, esta disminuye un 28.71% en FA, un 46.06% en FB y un 45.98% para FC. Esto puede indicar que en los fermentadores de madera los microorganismos que se inocularon al cacao naturalmente fueron más eficaces en metabolizar los sólidos solubles que en el fermentador de acero inoxidable. Sin embargo, el análisis estadístico ($P < 0.05$) no muestra diferencia significativa en los valores medios de los sólidos solubles de cada fermentador durante este proceso.

Los sólidos solubles totales de la pulpa en FA disminuyeron de 17.27 ± 0.12 a 2.83 ± 0.29, en FB disminuyó de 17.00 ± 0.00 a 2.83 ± 0.76 y para FC disminuyó de 17.27 ± 0.12 a 3.67 ± 1.15. Estos valores son similares a los reportados por [10]; sin embargo, estos datos difieren a los reportados por [16], donde a partir del día 2 de fermentación los sólidos solubles llegan a cero. Es posible que estas controversias se deban al tipo de bacterias que se inoculan naturalmente en los granos y su capacidad para fermentar el sustrato presente.

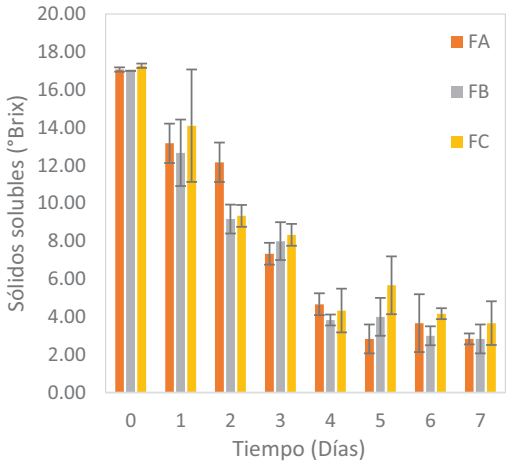


Fig. 4. Comportamiento de sólidos solubles del mucílago del cacao durante la fermentación. FA: Fermentador rotatorio de acero inoxidable. FB: Fermentador rotatorio de madera. FC: Fermentador de cajón de madera.

D. Humedad

Durante la fermentación es habitual que los granos de cacao pierdan humedad, esto puede ser debido a la difusión de la humedad hacia el exterior del grano y luego a causa de los volteos [21]. Este fenómeno se evidencia en los fermentadores FB y FC, donde la humedad disminuyó un 14.04% y 5.17%, respectivamente. Mientras que para FA el comportamiento fue contrario a lo esperado, ya que el porcentaje de humedad aumentó un 15.77%. Este aumento podría ser resultado de las dificultades que presentó el prototipo para drenar el mucílago, debido a que las ranuras se obstruyeron durante los primeros días de fermentación.

E. Índice de fermentación

Una forma de medir el grado de fermentación del cacao es mediante los cambios de color que suceden en los cotiledones. El color inicial de los granos es violeta, debido a la presencia de pigmentos como las antocianinas [22]. Durante la fermentación estos pigmentos se hidrolizan en antocianidinas y otros compuestos, que muestran un incremento de la absorbancia a 460 nm y una disminución a 530 nm [9], las antocianidinas posteriormente se polimerizan junto con las catequinas simples y forman taninos, por lo que el color de los granos pasa a marrón. De esta manera, el contenido de antocianinas y su medición indirecta mediante el índice de fermentación se han considerado un buen parámetro para determinar el grado de fermentación [19], [10].

En la figura 5, se puede observar que a medida que avanzan los días del proceso, el índice de fermentación aumenta, se inicia con valores de 0.12 ± 0.00, 0.13 ± 0.06 y 0.12 ± 0.01 y valores finales de 1.40 ± 0.01, 1.29 ± 0.06 y 1.57 ± 0.02 para los prototipos FA, FB y FC respectivamente, estos valores son similares a los reportados por [10]. El análisis estadístico no muestra diferencias significativas en las medias del índice de fermentación obtenido del cacao por tipo de fermentador.

Se considera que los valores iguales o mayores a uno en los granos, representan la condición de un buen grado de fermentación y lo contrario si son menores a uno. En este caso, a partir del día tres, el índice de fermentación es mayor

a uno en los tres fermentadores, resultado similar al citado por [19] durante este día de fermentación en su trabajo. No obstante, el proceso de fermentación en este momento no estaba completo y los granos por tanto se encontraban insuficientemente fermentados.

Por consiguiente, se infiere que el índice de fermentación no es un parámetro ideal para determinar el grado de fermentación individualmente, sino que este junto con otros indicadores como el pH, sólidos solubles, temperatura y prueba de corte, dan un panorama más completo sobre el grado de fermentación en los granos de cacao.

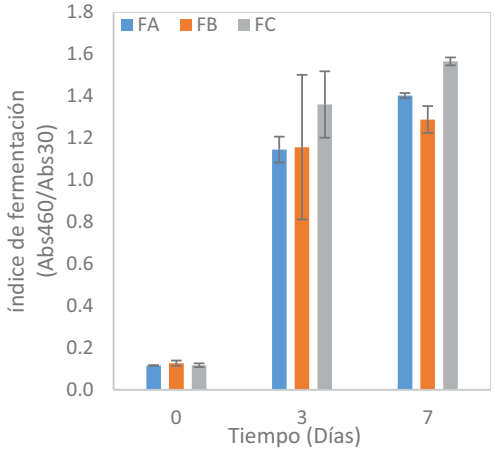


Fig. 5. Evolución del índice de fermentación en los fermentadores durante el proceso de fermentación. FA: Fermentador rotatorio de acero inoxidable. FB: Fermentador rotatorio de madera. FC: Fermentador de cajón de madera.

F. Evaluación mediante grupos focales

La calidad del cacao como producto intermedio se relaciona al sabor y olor de los granos y al licor de cacao, en la evaluación se incluye factores como: la ausencia de sabores desagradables (astringente, ácido, verde) y la presencia de sabores y aromas secundarios deseables (por ejemplo: floral, especiado, frutal, nuez, caramelo) [6]. En general, durante la evaluación los panelistas lograron identificar en cada una de las muestras de los fermentadores, el olor a cacao y tostado con una intensidad media y en el del licor proveniente del fermentador de caja un ligero olor dulce. En cuanto al aroma de las muestras de cada fermentador, los atributos que destacaron fueron el aroma a cacao y tostado nuevamente, en el caso del fermentador de caja se identificó ligeramente un aroma floral. El sabor ácido fue ligero en las muestras de cacao de FA y FB y el sabor amargo se acentuó en el licor de cacao de proveniente de FA y FC. En cuanto a la sensación de astringencia, esta se identificó ligeramente en las muestras de FA y FB.

En general el panel de expertos comentó que el tamaño de partícula en el licor debe refinarse aún más y dejar en reposo el licor durante 30 a 60 días a fin de mejorar la consistencia y poder apreciar mejor las notas de los sabores secundarios. Se expresó que el licor proveniente de FB estaba muy tostado. También comentaron que el licor de cacao proveniente de FC fue el que más les gustó; mientras que el licor proveniente de FA fue el que menos agrado obtuvo.

G. Parámetros medidos

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros medidos durante el proceso de fermentación en cada uno de los prototipos. Los resultados obtenidos, mostraron que solamente la temperatura media alcanzada por la masa fermentante presenta diferencias según el tipo de fermentador, en este caso el fermentador de cajón difiere de los otros dos, además de que alcanzó la máxima temperatura. Por otro lado, en la evaluación realizada por el grupo focal, los expertos describieron diferencias percibidas sensorialmente en los licores de cacao de las muestras, expresando que el licor proveniente del fermentador de cajón presentó mejores características frente a los otros dos.

Tabla 1. Resumen de parámetros evaluados en los diferentes tipos de fermentadores.

	Tipo de fermentador		
Parámetros	FA	FB	FC
Rango de temperatura (°C)	27.8±3.53-46.1±4.52	27.75±0.35-41.05±3.61	28.05±0.04-48.6±0.56
pH final	5.2 ± 0.2	5.67 ± 0.49	5.97 ± 0.15
Acidez final (mmol/g)	0.39 ± 0.04	0.31 ± 0.10	0.37 ± 0.03
Sólidos solubles (°Brix)	2.83 ± 0.29	2.83 ± 0.76	3.67 ± 1.15
Humedad (%)	50.36 ± 0.03	40.47 ± 0.02	47.91 ± 0.04
IF	1.40 ± 0.01	1.29 ± 0.06	1.57 ± 0.02

IV. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que el tipo de fermentador tiene un efecto en la fermentación, en este caso en particular condicionan la temperatura que alcanza la masa fermentante, puesto que existen diferencias significativas en las medias de las temperaturas de los prototipos rotatorios en comparación con el método tradicional, no obstante, entre los dos fermentadores rotatorios no se hayo diferencia alguna. De modo que se infiere que el material, forma, tipo de agitación y tamaño del fermentador influyen en este parámetro.

Los fermentadores rotatorios ya sea de madera o acero inoxidable son una alternativa al método tradicional de fermentación en cajas de madera, dado que en los parámetros fisicoquímicos de los granos de cacao como el pH, acidez, sólidos solubles, humedad e índice de fermentación no se encontraron diferencias significativas por fermentador. Es decir, que independientemente del tipo de fermentador los cambios fisicoquímicos, producto de la fermentación, tuvieron lugar en el cacao de los prototipos conforme avanzó el proceso.

Aunque los prototipos utilizados son un método alternativo, tuvieron ciertas deficiencias al momento de fermentar el cacao, los volteos en el fermentador rotatorio de madera no se lograron efectuar mediante el movimiento de palanca, debido al peso del cacao y en el fermentador rotatorio de acero las ranuras del drenaje se obstruyeron en

un inicio de la fermentación, por lo que el mucílago del cacao quedó en las paredes del fermentador.

La evaluación sensorial del panel de expertos sugiere que el licor de cacao de la muestra fermentada y seca del fermentador de cajón obtuvo características más deseadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento de la presente investigación a través del Proyecto IDDSE19-012. De igual manera se agradece al Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI) por el apoyo técnico brindado en especial al Ing. Yoel Martin y al Ing. Luis Mogollón, al Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA) por la prestación de los laboratorios y al Centro Regional de la Universidad Tecnológica de Panamá en Bocas del Toro por el apoyo brindado. Se le agradece al CEMCIT y a los miembros de la Cooperativa Solary R.L. en Cilico Creek por el apoyo, la materia prima y el espacio asignado. Un especial agradecimiento a la Dra. Rosa Quintero por apoyar con materiales, equipos y su conocimiento, e igualmente al Mgtr. Bolívar Bernal por brindar apoyo en el análisis estadístico.

REFERENCIAS

[1] International Cocoa Organization - Statistics. (2019/2020). International Cocoa Organization. Retrieved July 21, 2022, from https://www.icco.org/statistics/#production

[2] Teneda Llerena, W. F. (2016). Mejoramiento del proceso de fermentación del cacao (Theobroma cacao L.). Variedad Nacional y Variedad CCN51. Universidad Internacional De Andalucía. http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3743/2016_978-84-7993-319-7.pdf

[3] Fang, Y., Li, R., Chu, Z., Zhu, K., Gu, F., & Zhang, Y. (2020). Chemical and flavor profile changes of cocoa beans (Theobroma cacao L.) during primary fermentation. Food Science and Nutrition, 8(8), 4121–4133. https://doi.org/10.1002/fsn3.1701

[4] Parra, P., Castillo, O., & Maldonado, P. (2019). Alternative method for the fermentation of cocoa beans. IEEE ICA-ACCA 2018 - IEEE International Conference on Automation/23rd Congress of the Chilean Association of Automatic Control: Towards an Industry 4.0 - Proceedings. https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609760

[5] Lima, J. R., Almeida, Nout, M. J., Zwietering, M. (2011). Theobroma cacao L ., " The Food of the Gods ": Quality Determinants of Commercial Cocoa Beans , with Particular Reference to the Impact of Fermentation. https://doi.org/10.1080/10408391003799913

[6] Velásquez, L. M. (2016). Influencia del proceso de fermentación sobre las características de calidad del grano de cacao (Theobroma cacao). https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59884

[7] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSO. (2015). INEC. Meteorología: año 2015. https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=821&ID_CATEGORIA=2&ID_SUBCATEGORIA=4

[8] AOAC, 1974. Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis of AOAC International.

[9] Nazaruddin, R., Seng, L. K., Hassan, O., & Said, M. (2006). Effect of pulp preconditioning on the content of polyphenols in cocoa beans (Theobroma Cacao) during fermentation. Industrial Crops and Products, 24(1), 87–94. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.03.013

[10] Hernández, M. del P. L., Núñez, J. C., Gómez, M. S. H., & Tovar, M. D. L. (2019). Physicochemical and microbiological dynamics of the fermentation of the CCN51 cocoa material in three maturity stages. Revista Brasileira de Fruticultura, 41(3), 0–2. https://doi.org/10.1590/0100-29452019010

[11] Gourieva, K.B., Tserrevitinov, O.B., 1979. Method of evaluating the degree of fermentation of cocoa beans. USSR Patent no. 646254.

[12] Moreno-martínez, E., Gavanzo-cárdenas, Ó. M., & Rangel-silva, F. A. (2019). Evaluación de las características físicas y sensoriales de licor de cacao asociadas a modelos de siembra. https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n3.2019.9890

[13] Castillo, J. (2019). DISEÑO DE UN FERMENTADOR ORIENTADO A MEJORAR EL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO CRIOLLO BLANCO DE PIURA [Universidad de Piura]. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4017

[14] De Vuyst, L., & Weckx, S. (2016). The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. Journal of Applied Microbiology, 121(1), 5–17. https://doi.org/10.1111/jam.13045

[15] de Melo Pereira, G. V., Magalhães, K. T., de Almeida, E. G., da Silva Coelho, I., & Schwan, R. F. (2013). Spontaneous cocoa bean fermentation carried out in a novel-design stainless steel tank: Influence on the dynamics of microbial populations and physical-chemical properties. International Journal of Food Microbiology, 161(2), 121–133. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.11.018

[16] Hernández-Hernández, C., López-Andrade, P. A., Ramírez-Guillermo, M. A., Guerra Ramírez, D., & Caballero Pérez, J. F. (2016). Evaluation of different fermentation processes for use by small cocoa growers in mexico. Food Science and Nutrition, 4(5), 690–695. https://doi.org/10.1002/fsn3.333

[17] Camu N, De Winter T, Verbrugghe K, Cleenwerck I, Vandamme P, Takrama JS, Vancanneyt M, De Vuyst L. 2007. Dynamics and biodiversity of populations of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria involved in spontaneous heap fermentation ofcocoa beans in Ghana. Appl Environ Microbiol 73(6):1809–24. doi: 10.1128/AEM.02189-06. Epub 2007 Feb 2. PMID: 17277227; PMCID: PMC1828797.

[18] Amores, P., Palacios, A., Jiménez, B., & Zhang, D. (2009). Entorno ambiental, genética, atributos de calidad y singularización del cacao en el Nororiente de la provincia de Esmeraldas-Ecuador. Quevedo: Estación Experimental Tropical Pichilingue. https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1565

[19] Romero-Cortes, T., Salgado-Cervantes, M. A., García-Alamilla, P., García-Alvarado, M. A., del C Rodríguez-Jimenes, G., Hidalgo-Morales, M., & Robles-Olvera, V. (2013). Relationship between fermentation index and other biochemical changes evaluated during the fermentation of Mexican cocoa (Theobroma cacao) beans. Journal of the Science of Food and Agriculture, 93(10), 2596–2604. https://doi.org/10.1002/jsfa.6088

[20] Araujo, Q. R., Fernandes, C. A. F., Ribeiro, D. O., Efraim, P., Steinmacher, D., Lieberei, R., Bastide, P., & Araujo, T. G. (2014). Cocoa Quality Index - A proposal. Food Control, 46, 49–54. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.05.003

[21] Calvo, A. M., Botina, B. L., García, M. C., Cardona, W. A., Montenegro, A. C., & Criollo, J. (2021). Dynamics of cocoa fermentation and its effect on quality. Scientific Reports, 11(1), 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95703-2

[22] Kongor, J. E., Felix Takrama, J., Simpson Budu, A., Mensah-Brown, H., & Afoakwa, E. O. (2013). Effects of Fermentation and Drying on the Fermentation Index and Cut Test of Pulp Pre-conditioned Ghanaian Cocoa (Theobroma cacao) Beans. Journal of Food Science and Engineering, 3, 625–634. https://www.researchgate.net/publication/270272357_Effects_of_Fermentation_and_Drying_on_the_Fermentation_Index_and_Cut_Test_of_Pulp_Pre-conditioned_Ghanaian_Cocoa_Theobroma_cacao_Beans

Assessment of *Saccharum spontaneum* L. biochar potential for soil improvement

Evaluación del potencial del biochar de *Saccharum spontaneum* L. para el mejoramiento de suelos

Josué Prens
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
josue.prens@utp.ac.pa

Joisleen Ramírez
Facultad de Ingeniería Mecánica
Univesidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
joisleen.ramirez@utp.ac.pa

Arthur James
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
arthur.james@utp.ac.pa

Zöhre Kurt
Department of Environmental Engineering
Middle East Technical University
Ankara, Turkey
zkurt@metu.edu.tr

José E. Villarreal
Investigador Agrícola
Jefe del Laboratorio de Fertilidad de Suelo, IDIAP – CIA Divisa – Carretera Panamericana
Panamá, Panamá
jevilla38@gmail.com

***Abstract* — Population growth has increased the demand for food, intensifying land use for agricultural activities. At the same time, soils have lost their fertility due to the uncontrolled use of agrochemicals, harmful practices, and climate change. In Panama, 27 % of the soil is not available for agriculture. These regions correspond to the sectors with the highest agricultural production in the country. Therefore, various methods have been investigated to improve soil fertility, such as using biochar as a soil amendment and fertilizer. Biochar is a carbonaceous material produced by the thermochemical decomposition of organic materials. Biomaterial production from fast-growing plants has gained interest over the years. Furthermore, wild sugarcane (*Saccharum spontaneum* L.) is a tall, fast-growing, invasive grass in Panama that shows biomass production potential. Recent reports indicate that this plant could be converted into biochar or carbon, producing a biomaterials source for soil remediation. This work aims to evaluate the potential of wild sugarcane biochar as a soil amendment. The samples maintained a pH > 9.0 and an ash percentage of approximately 20 %. At 8 L/min, a higher proportion of nutrients such as Mn, Fe, Mg, and P was obtained with 161 mg/kg, 310 mg/kg, 0.279 %, and 0.461 %, respectively. At 12 L/min, organic carbon was higher, with 61.32 %. The resulting biochar has essential characteristics and properties that could be used in soil improvement.**

Keywords— Saccharum spontaneum L., biochar, gasification, soil amendment, top-lit updraft

***Resumen* — El aumento poblacional ha incrementado la demanda de alimentos, intensificando el uso de los suelos para actividades agrícolas. Simultáneamente, los suelos han perdido su fertilidad debido al uso descontrolado de agroquímicos, prácticas nocivas y el cambio climático. En Panamá, 27 % de los suelos no están disponibles para actividades agrícolas. Estas regiones coinciden con los sectores de mayor producción agropecuaria del país. Por esto, se han investigado diversos métodos para aumentar la fertilidad de los suelos, incluyendo el uso de biochar como posible enmienda de suelos y fertilizante. El biochar es un material carbonáceo producto de la descomposición termoquímica de materiales orgánicos. La paja canalera (*Saccharum spontaneum* L.) es una planta alta, invasora y de crecimiento rápido que presenta potencial de producción de biomasa en Panamá. Estudios recientes de esta planta indican que podría utilizarse para la producción de biochar para la remediación de los suelos. El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial de la paja canalera carbonizada para su uso como posible mejorador de suelos. Se observó que las muestras mantenían un pH > 9.0 y un porcentaje de cenizas aproximadamente de 20 %. A 8 L/min se obtuvo mayor proporción de nutrientes como Mn, Fe, Mg, y P con 161 mg/kg, 310 mg/kg, 0.279 % y 0.461 %, respectivamente. A 12 L/min el carbón orgánico fue superior, con valor de 61.32 %. El biochar resultante presenta características y propiedades esenciales que podrían ser utilizadas en el mejoramiento de suelos.**

Palabras claves — Saccharum spontaneum L., biochar, gasificación, enmienda de suelos, top-lit updraft

I. Introduction

Population growth has led to the inefficient use of natural resources. Additionally, the requirement to supply the population's necessities provokes natural resource deterioration [1], [2]. For example, more rainfall anomalies have caused droughts and floods in different countries and regions [2]. Furthermore, the irregularities generate an additional temperature increase affecting water resources' quality and augmenting pathogens [3]. In addition, the rise in population has caused air quality to decrease. This decrease is due to increased fumes and harmful gases, such as carbon monoxide and particulate matter. Therefore, increasing the risk of respiratory diseases [4]. Soil fertility has also been affected due to uncontrolled agrochemicals, harmful fertilizers, and practices such as burning organic waste [5]. The increasing demand for food has contributed to the deterioration of soils [6]. Additionally, poverty and hunger levels keep rising [7]. Furthermore, a third of the Earth's soils were unsuitable for agriculture in 2017. About twenty-four billion tons of fertile soil are lost annually due to intensive farming practices that seek to decrease the demand for food [8].

In the Republic of Panama, 27% of the land is unsuitable for agriculture. Most of these soils are found in Cerro Punta, the Dry Arc region, the central veragüense savannah, and the Ngöbe Buglé county [9]. These regions are responsible for most of the country's food production [10]. In addition, Panamanian soils are classified as very acidic, acidic, slightly acidic, and low acidic, with some sectors of the country presenting alkaline soils. Nutrient availability depends on the soil's pH level. For example, acidic soils (pH < 7) present greater amounts of aluminum (Al), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn). Instead, alkaline soils (pH > 7) show higher amounts of phosphorus (P), calcium (Ca), magnesium (Mg), and potassium (K) [10], [11]. The country's central region exhibits iron and aluminum oxides that function as phosphorus fixers in the soil, which causes this nutrient to be present in small quantities. In contrast, soils nearby the

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00072

Pacific Coast present superior levels of Ca and Mg. Additionally, this area exhibits the highest agricultural production in the country [11]. However, the unrestricted use of chemical fertilizers causes a deficiency of essential soil nutrients [12]–[14]. Therefore, soil and crop type must be analyzed to determine a deficit or inadequate disposition of nutrients. Nevertheless, inappropriate pH levels, organic matter, and nutrients such as nitrogen, aluminum, and magnesium can alter soil productivity [15], [16].

In recent decades, new strategies have been developed to mitigate the loss of soil fertility. Sustainable technologies and new agricultural techniques seek to provide soil micro and macronutrients. Therefore, the use of biochar to amend deteriorated soils has emerged and gained popularity. Soil improvement has been reported after biochar application [17]–[19]. Biomass can be transformed into biochar via pyrolysis, gasification, and torrefaction. [20]. Pyrolysis is a thermal process performed without oxygen, occurring between 300 °C and 900 °C [21]. In addition, pyrolysis can be slow or fast, producing biochar or bio-oil, respectively [20], [22]. In contrast, gasification is a thermochemical transformation process performed in the presence of a gasifying agent such as oxygen [23], [24]. The main product of this treatment is syngas. However, biochar obtained by gasification shows high mineral and recalcitrant carbon contents [25], [26]. Gasification biochar is considered to have enormous potential for soil improvement [27]. In addition, gasification biochar has greater energy efficiency and stability than pyrolysis biochar [28], [29].

Panama has the presence of invasive plants, such as *Saccharum spontaneum* L, which occupies between 2 % and 3 % of the Panama Canal watershed [30]. Wild sugarcane is a lignocellulosic, perennial, herbaceous, C4-type plant with appropriate adaptation in poorly fertile and eroded lands [30], [31]. This plant's exact origin is unknown. However, studies predict it to be native to African countries and tropical and temperate Asia. Due to its extensive root system, *S. spontaneum* can enhance the physicochemical properties of eroded soils [31]. Chen et al. [32] determined the wild sugarcane's potential to produce biochar. This work aims to produce and characterize biochar from *Saccharum spontaneum* L. using airflow rates of 8 L/min and 12 L/min. The physicochemical properties of the biochar were considered to assess the potential of biochar as an alternative for soil improvement.

II. Materials and Methods

The biomass was processed following the methodology proposed by Chen et al. [32]. The carbonization process was adopted from the study by James et al. [33], using a top-lit updraft (TLUD) gasifier and airflow rates of 8 and 12 L/min. Three replicates were performed per flow. The temperatures were registered using an Onset data logger, model UX120-006M, HOBO UX120 (Massachusetts, United States). A TradeMaster® TOOLS (Illinois, United States) compressor was used for air supply. The airflow rate was regulated with a Bel-Art™ Riteflow® flowmeter (New Jersey, United States). Additionally, the preparation of the samples for proximate analysis tests was similar to that of James et al. [33]. Moisture, volatile matter, and ash content were determined under ASTM standards D3173-97, 3175-89(02), and D3172-89(02), respectively. Fixed carbon was obtained by difference. Two grams were taken from each sample, weighted using an analytical balance Mettler Toledo®, NewClassic MF, MS304S/03 (United Kingdom).

Electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), and hydrogen potential (pH) were determined following James et al. methodology [24]. Briefly, solutions of 1:20 were prepared in deionized water and left to stand for 2 hours. The samples were filtered twice using quantitative filter paper FILTER-LAB® #1240 (Spain). The properties were determined using a Thermo-SCIENTIFIC® multiparameter, ORION VERSATAR PRO™, performing each analysis duplicate. An average of these measurements was then made. Chloride (Cl^-) determination was performed following the methodology described by Prens et al. [34]. A dilution factor of 20 was applied due to the samples' dark color, which difficulted the Cl^- determination. The surface area was determined with the Bruanuer-Emmet-Teller (BET) method [24] with 0.4 g of biochar and feedstock samples. Before the BET analysis, sample degassing occurred at 100 °C and reduced pressure (~1 mmHg) in a vacuum stove. Additional degassing was performed on the vacuum line. The measurement of the dead volume of the equipment was performed with helium.

Chemical composition analysis was performed following the methodology of Bethancourt et al. [35]. The total nitrogen (N_2) and total phosphorus (P_2O_5) content were determined using the AOAC 993.13 and AOAC 958.01 methods, respectively. Potassium (K_2O), magnesium (Mg), boron (B), calcium (CaO), zinc (Zn), manganese (Mn), copper (Cu), iron (Fe), and sulfur (S) levels were determined, following AOAC 958.02, AOAC 984.01, AOAC 982.01, AOAC 945.04, AOAC 975.02, AOAC 972.02, AOAC 975.01, AOAC 980.01 and AOAC 980.02 methods, respectively. Organic carbon (OC) and organic matter (OM) were determined by the Walkley-Black wet digestion method.

III. Results and Discussion

A. Airflow effect on biochar properties

The gasification of *Saccharum spontaneum* L. exhibited average maximum temperatures of 556.70 °C and 589.37 °C for airflow rates of 8 and 12 L/min, respectively (Fig. 1). The rise in temperatures can be attributed to the increase in oxygen supply, promoting exothermic reactions in the combustion zone. James et al. [36] and Bethancourt et al. [35] reported similar behavior when generating biochar from rice husks. Table 1 compiles the results of wild sugarcane biochar (WSB) analyses. Biochar volatile matter content decreased from 45.53 % to 42.77 % as airflow increased. This reduction can be attributed to the devolatilization that occurs at temperatures between 250 °C and 350 °C.

Díez et al. [37] found a similar trend in *Pinus patula* biochar. Additionally, the ash content in wild sugarcane biochar decreased from 20.03 % to 19.97 %. In contrast, the increase in airflow caused a rise in fixed carbon, from 28.09 % to 33.25 %. This increase may be due to the decrease in the volatile matter, leaving behind carbon resulting from the photosynthetic fixation of CO_2. James et al. [36] and Díez et al. [37] obtained equivalent results by increasing airflow in the carbonization of wood chips and *Pinus patula*, respectively

Furthermore, WSB electrical conductivity (EC) increased from 2,508 to 3,276 μS/cm as the airflow rate increased. Díez et al. [37] reported a similar EC behavior with increasing airflow. Similarly, a temperature increase causes a rise in total

dissolved solids (TDS). The relation between EC and TDS is consistent with the ratio between TDS and EC for values between 50 µS/cm and 10,000 µS/cm. The biochar's hydrogen potential (pH) turned out to be alkaline by increasing airflow. Values of 9.39 and 10.08 were observed. Fryda et al. [21] and Yang et al. [25] reported similar pH values in biochar from agricultural waste and a combination of wood and other biomasses, respectively. Applying wild sugarcane biochar to acidic soils could increase pH, improving the assimilation of nutrients such as N, P, and K [38].

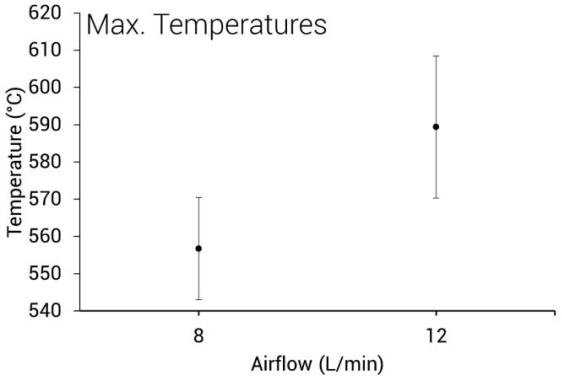


Fig. 1. Maximum temperatures achieved during the gasification process. The temperatures showed a direct relation with airflow rate.

Furthermore, BET surface area showed a slight increase with airflow and temperature rise, from 3.17 m^2/g to 3.50 m^2/g. This behavior correlates with studies showing that higher temperatures augment the biochar surface area [39], [40]. James et al. [36] observed a similar surface area rise with an increased airflow rate. Surface area and pore size are essential features in biochars used as soil remediators. Porous materials harbor microorganisms that enhance nutrient exchange between soil and plants [17]. In addition, the porous structure of biochar intervenes in soil water retention. This property could benefit sectors with low rainfall or extended drought, helping soil stay moisturized for prolonged periods [41]. The wild sugarcane biochar surface area has lower values than those reported by Yakout [42] and Li et al. [43]. This behavior could be explained by observing gasification temperatures achieved in this study. The surface area tends to increase with increasing temperature. Therefore, wild sugarcane biochar may attain a larger surface area with temperatures above 700 °C.

B. Influence of biochar properties on soil improvement

S. spontaneum L. contains organic matter (OM) and organic carbon (OC) that are essential for soils. Biochar production increased wild sugarcane OC and OM. Furthermore, OC rose from 60.29 % to 61.32 % with an increased airflow rate (Table II). WSB organic matter increased above 100 % during gasification, generating 100 % organic biochar contrasting wild sugarcane feedstock (69.56 % OM). Agro-industrial residues tend to have higher OM content, which helps increase soil fertility and nutrient disposal. In addition, higher OM content improves waste management and control of invasive plants [44]. Nonetheless, organic matter tends to decrease at temperatures above 550 °C. This behavior occurs by volatilization and removal of solids present in the raw material [45]. However, after the carbonization process, the organic matter depends on the feedstock hemicellulose, cellulose, lignin, and pectin composition [44]. Hemicellulose begins to break down between 220 °C and 315 °C, while cellulose decomposes between 300 °C and 400 °C [33], [35]. Lignin is the third product to deteriorate, which presents a progressive disintegration ranging from 100 °C to 900 °C [46]. At this temperature, the estimated solid residue left in the biochar is approximately 47% by weight. It is inferred that the increase in the proportion of organic matter compared to the raw material is due to this availability after carbonization.

The rise in OM could be due to inorganic mass loss from carbonization [47]. Furthermore, soil with organic matter deficiency also exhibits a lack of organic carbon [48]. Biochar application increases soil organic carbon while contributing to soil carbon sequestration by reducing greenhouse gas emissions [49], [50]. Therefore, biochar surface area may help the soil exchange and retain nutrients [50]. Cooper et al. [51] demonstrated that the long-term application of beech and pine wood biochar increased both organic carbon and soil pH. Moreover, adding biochar and compost increased the disposition of the particulate organic matter and organic carbon in the soil by 10 to 32 times more.

Wild sugarcane biochar showed nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). Nitrogen decreases with the influence of airflow from 12,600 mg/kg to 11,200 mg/kg for airflow rates of 8 and 12 L/min, respectively. Nitrogen deficiency can slow and halt crop production. Even if nitrogen's addition to soils generates exponential crop growth, the stems can grow weak and break [52]. Similarly, phosphorus decreased with a 33 °C temperature rise, from 4,610 mg/kg to 4,500 mg/kg. This behavior correlates with phosphorus decreasing at elevated temperatures [53]. In contrast, potassium increased from 46,900 mg/kg to 50,900 mg/kg with airflow rate increase (Table II).

TABLE I. WILD SUGARCANE AND RICE STRAW BIOCHAR PROXIMATE AND PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS.

Parameter	***Saccharum spontaneum* L.**			**Rice straw** [42]
	Feedstock	**8 L/min**	**12 L/min**	**Pyrolysis at 500 °C**
Moisture (%)	9.47	7.08	4.01	-
Volatile matter (%)	80.49	45.53	42.77	-
Fixed carbon (%)	4.72	28.09	33.25	-
Ashes (%)	5.32	20.03	19.97	50.1
Electrical conductivity (µS/cm)	1,855	2,508	3,276	-
Total dissolved solids (mg/L)	927.5	1,254	1,638	-
pH	7.74	9.39	10.08	9.2
Chlorides (mg/L)	47.86	53.18	55.54	-
BET surface area (m^2/g)	1.945	3.17	3.50	96.0

The macronutrient value in wild sugarcane biochar is similar to other studies [54]. Macronutrients such as phosphorus and potassium are essential for plant growth and development [38]. These elements are considered fixed nutrients. To maximize the benefit of their properties, they must be close to the roots of plants. Sadowska et al. [55] obtained favorable results in the behavior and increase of macronutrients when evaluating the application of biochar in the soil for two years. Nitrogen increased progressively over

the time interval as $N\text{-}NH_4$. In comparison, $N\text{-}NO_3$ had exponential growth in the first year of application. However, this nutrient decreased in the samples with biochar and the control during the last year. Similar behavior was obtained with potassium. Nonetheless, the K decrease over the previous year was minimal compared to N. In contrast, P content did not increase with biochar application. The soil phosphorus availability could explain phosphorus behavior—different biochar feedstock apport different values. For example, animal manure or biomass with a lower C/N ratio is more efficient at improving the availability of P in the soil [56].

Wild sugarcane biochar shows magnesium (Mg) and calcium (Ca). Mg decreases with an increase in airflow rate. Values of 2,790 mg/kg and 2,600 mg/kg were obtained when the airflow was increased from 8 L/min to 12 L/min. While calcium increases with airflow, ranging from 8,100 mg/kg to 8,300 mg/kg (Table II). These nutrients are considered secondary nutrients. They decrease at temperatures above 600 °C [53]. However, calcium increase could be due to biomass loss after gasification. Furthermore, the application of wild sugarcane biochar could increase the levels of Mg in the acidic soils of Panama while increasing pH and crop productivity [10], [57].

Regarding micronutrients, wild sugarcane biochar samples show zinc (Zn), manganese (Mn), and iron (Fe). Mn and Fe decrease with increasing airflow from 161 mg/kg to 144.5 mg/kg and 310 mg/kg to 224.5 mg/kg, respectively. At the same time, Zn increases following airflow rate increase, from 153 mg/kg to 167 mg/kg (Table II). These nutrients are essential for soils in agricultural areas. Mn, Fe, and Zn are micronutrients because they appear in lower concentrations than macronutrients [58]. Moreover, the micronutrient content present in biochar is limited to the feedstock micronutrients. The ratio of N, P, K, Fe, Mn, and Zn allows better behavior in the germination and growth of various crops [58]. Therefore, biochar application increases soil nutrients and improves soil composition.

TABLE II. CHEMICAL COMPOSITION OF BIOCHAR AND THE RAW MATERIAL OF *SACCHARUM SPONTANEUM* L. AND RICE STRAW [42].

Parameter	***Saccharum spontaneum* L.**			**Rice straw**[42]
	Raw material	**8 L/min**	**12 L/min**	**Pyrolysis at 500 °C**
N_2 (mg/kg)	9,300	12,600	11,200	1.3[a]
P_2O_5 (mg/kg)	1,900	4,610	4,500	2,875
K_2O (mg/kg)	17,200	46,900	50,900	13,773
Mg (mg/kg)	1,540	2,790	2,580	3,100
B (mg/kg)	6.05	9.67	15.7	-
CaO (mg/kg)	3,490	8,080	8,340	7,289
Zn (mg/kg)	25.6	153	167	nd[b]
Mn (mg/kg)	47.5	161	144.5	439
Cu (mg/kg)	4.54	10.5	8.71	nd[b]
Fe (mg/kg)	145	310	224.5	5,357
S (mg/kg)	1,130	1,820	1,960	-
Organic matter (%)	69.56	103.9	105.7	-
Organic carbon (%)	40.35	60.29	61.32	-

a. % m/m

b. Not detected

CONCLUSION

Wild sugarcane (*S. spontaneum* L.) was carbonized in a top-lit updraft gasifier (TLUD) for biochar production. Analyses of wild sugarcane biochar show that it could be used as an alternative to improve soil's physical and chemical properties. Wild sugarcane biochar produced at 8 and 12 L/min presented greater availability of nutrients, such as P, Mg, Mn, and Fe than wild sugarcane feedstock and rice hulls biochar. Therefore, wild sugarcane biochar could improve soil quality and fertility. Moreover, wild sugarcane biochar can be implemented to increase the pH and improve the plant's uptake of nutrients in acidic soils. However, further studies are required to understand the effect of WSB as a soil amendment.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors want to thank Panama's National Research System (SNI) and National Secretariat of Science, Technology, and Innovation (SENACYT) for their economic contribution in conducting this work. The authors also thank the project Carbonización de Biomasa: Aprovechamiento de residuos agrícolas para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo en áreas de cultivo (proyecto No. 66-2019-ITE18-R2-016) for the support provided.

REFERENCES

[1] R. Bhagawati, S. Paul, and A. Dambale, "ROLE OF AGROFORESTRY SYSTEM IN CARBON SEQUESTRATION FOR REGULATING CLIMATE CHANGE," in *Agriculture Development and Economic Transformation in Global Scenario*, Part 1., Mahima Research Foundation and Social Welfare, 2020, pp. 35–42.

[2] V. Stoehrel, "The impacts of climate change upon food security in the world : The interaction between physical, biological and societal systems," *Theoria*, vol. 20, no. 1, pp. 51–63, 2011.

[3] G. Nichols, I. Lake, and C. Heaviside, "Climate change and water-related infectious diseases," *Atmosphere (Basel)*, vol. 9, no. 10, pp. 1–60, 2018, doi: 10.3390/atmos9100385.

[4] S. Saleh *et al.*, "Air pollution interventions and respiratory health: A systematic review," *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, vol. 24, no. 2, pp. 150–164, 2020, doi: 10.5588/ijtld.19.0417.

[5] I. V. Abrudan, B. Popa, C. Codreanu, C. Vacalie, and A. Varga, *Combating Climate Change by Restoration of Degraded Land*. Braşov, 2014.

[6] V. Hansen, D. Müller-Stöver, J. Ahrenfeldt, J. K. Holm, U. B. Henriksen, and H. Hauggaard-Nielsen, "Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment," *Biomass Bioenergy*, vol. 72, no. 1, pp. 300–308, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2014.10.013.

[7] PNUD, "Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)," *Objetivos de Desarrollo Sostenibles*, 2015. https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html

[8] J. Watts, "The Guardian," *Third of Earth's soil is acutely degraded due to agriculture*, 2017. [Online]. Available: https://www.theguardian.com/environment/2017/sep/12/third-of-earths-soil-acutely-degraded-due-to-agriculture-study

[9] Ministerio de Ambiente, "Atlas De Las Tierras Secas y Degradadas De Panamá," 2009. [Online]. Available: http://www.miambiente.gob.pa/images/stories/BibliotecaVirtualImg/CambioClimatico/atlas_tierras_secas.pdf

[10] J. E. Villarreal, I. Ramos, J. Villalaz, and A. Santo, "Clasificación taxonómica y caracterización físico-química de los suelos de la región de Azuero-Panamá," pp. 1–7, 2017.

[11] J. Villarreal, B. Name, and R. García, "Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes," *Ciencia Agropecuaria*, vol. 21, pp. 71–89, 2013.

[12] A. Bastidas, "Diagnóstico de fertilidad de suelos en pendientes inferiores a 25%. Boconó, estado Trujillo," *Geoenseñanza*, vol. 5, no. 2, pp. 229–246, 2000.

[13] Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, vol. I. Roma, 2015. [Online]. Available: http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf

[14] T. S. Raj, *Current Research in Soil Fertility*. New Delhi: AkiNik, 2019. doi: 10.22271/ed.book.964.

[15] G. Sánchez, J. Ramírez, A. James, E. Deago, and J. Villarreal, "Evaluación del potencial de lodos orgánicos carbonizados de una planta de tratamiento de aguas residuales para el mejoramiento de suelos," *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, pp. 292–299, Jun. 2021, doi: 10.33412/apanac.2021.3198.

[16] A. James, J. Ramírez, M. Cedeño, N. Marín, E. Serrano, and H. Álvarez, "Avances de Proyecto Carbonización de Biomasa | Aprovechamiento de residuos agrícolas para el mejoramiento de las propiedades físico-químicas del suelo en áreas de cultivo," *XVIII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología (APANAC 2021)*, pp. 300–308, 2021, doi: doi.org/10.33412/apanac.2021.3199.

[17] J. Lehmann, M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday, and D. Crowley, "Biochar effects on soil biota - A review," *Soil Biol Biochem*, vol. 43, no. 9, pp. 1812–1836, 2011, doi: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

[18] S. G. Lu, F. F. Sun, and Y. T. Zong, "Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol)," *Catena (Amst)*, vol. 114, pp. 37–44, 2014, doi: 10.1016/j.catena.2013.10.014.

[19] W. Ouyang, X. Zhao, M. Tysklind, and F. Hao, "Typical agricultural diffuse herbicide sorption with agricultural waste-derived biochars amended soil of high organic matter content," *Water Res*, vol. 92, pp. 156–163, 2016, doi: 10.1016/j.watres.2016.01.055.

[20] J. S. Cha *et al.*, "Production and utilization of biochar: A review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 40, pp. 1–15, 2016, doi: 10.1016/j.jiec.2016.06.002.

[21] L. Fryda and R. Visser, "Biochar for Soil Improvement: Evaluation of Biochar from Gasification and Slow Pyrolysis," *Agriculture*, vol. 5, no. 4, pp. 1076–1115, 2015, doi: 10.3390/agriculture5041076.

[22] S. Kloss *et al.*, "Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties," *J Environ Qual*, vol. 41, no. 4, pp. 990–1000, Jul. 2012, doi: 10.2134/jeq2011.0070.

[23] S. You *et al.*, "A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications," *Bioresour Technol*, vol. 246, pp. 242–253, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.06.177.

[24] A. M. James R., W. Yuan, D. Wang, D. Wang, and A. Kumar, "The Effect of Gasification Conditions on the Surface Properties of Biochar Produced in a Top-Lit Updraft Gasifier," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 688, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10020688.

[25] X. Yang *et al.*, "Effect of gasification biochar application on soil quality: Trace metal behavior, microbial community, and soil dissolved organic matter," *J Hazard Mater*, vol. 365, pp. 684–694, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.042.

[26] R. Muvhiiwa, A. Kuvarega, E. M. Llana, and A. Muleja, "Study of biochar from pyrolysis and gasification of wood pellets in a nitrogen plasma reactor for design of biomass processes," *J Environ Chem Eng*, vol. 7, no. 5, p. 103391, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103391.

[27] V. Hansen, D. Müller-Stöver, L. J. Munkholm, C. Peltre, H. Hauggaard-Nielsen, and L. S. Jensen, "The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: An incubation study," *Geoderma*, vol. 269, pp. 99–107, May 2016, doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.033.

[28] I. Ahmed and A. K. Gupta, "Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper," *Appl Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1813–1821, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.01.025.

[29] C. E. Brewer, K. Schmidt-Rohr, J. A. Satrio, and R. C. Brown, "Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems," *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 386–396, Oct. 2009, doi: 10.1002/ep.10378.

[30] K. Saltonstall, G. D. Bonnett, and K. S. Aitken, "A perfect storm: ploidy and preadaptation facilitate Saccharum spontaneum escape and invasion in the Republic of Panama," *Biol Invasions*, vol. 23, no. 4, pp. 1101–1115, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10530-020-02421-3.

[31] V. C. Pandey, O. Bajpai, D. N. Pandey, and N. Singh, "Saccharum spontaneum: an underutilized tall grass for revegetation and restoration programs," *Genet Resour Crop Evol*, vol. 62, no. 3, pp. 443–450, 2015, doi: 10.1007/s10722-014-0208-0.

[32] J. Chen, A. James, E. Deago, Z. Kurt, and M. D. L. A. Ortega, "CASO VIII . Implementación de Saccharum spontaneum L . como materia prima en el tratamiento de aguas contaminadas," *Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T)*, pp. 169–197, 2021, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/354555623_CASO_VIII_Implementacion_de_Saccharum_spontaneum_L_como_materia_prima_en_el_tratamiento_de_aguas_contaminadas

[33] A. James, "Simultaneous Biochar and Syngas Production in a Top-Lit Updraft Biomass Gasifier," North Carolina State University, 2015.

[34] J. Prens and A. Sánchez, "Producción y Caracterización del Carbón Producido a partir de Paja Canalera," Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, 2021.

[35] G. Bethancourt, A. James, J. E. Villarreal, and N. Marin-Calvo, "Biomass carbonization - production and characterization of biochar from rice husks," *Proceedings - 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2019*, pp. 40–45, 2019, doi: 10.1109/IESTEC46403.2019.00016.

[36] A. James, W. Yuan, M. D. Boyette, D. Wang, and A. Kumar, "Characterization of Biochar from Rice Hulls and Wood Chips Produced in a Top-Lit Updraft Biomass Gasifier," *Trans ASABE*, vol. 59, no. 3, pp. 749–756, Jun. 2016, doi: 10.13031/trans.59.11631.

[37] H. E. Díez and J. F. Pérez, "Effects of wood biomass type and airflow rate on fuel and soil amendment properties of biochar produced in a top-lit updraft gasifier," *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 38, no. 4, p. 13105, Jul. 2019, doi: 10.1002/ep.13105.

[38] M. Andrades and E. Martínez, *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*, 3rd ed. 2014.

[39] E. M. C. C. Batista *et al.*, "Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-28794-z.

[40] Z. Z. Chowdhury, M. Ziaul Karim, M. A. Ashraf, and K. Khalid, "Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of biochar derived from slow pyrolysis of durian wood (Durio zibethinus) sawdust," *Bioresources*, vol. 11, no. 2, pp. 3356–3372, 2016, doi: 10.15376/biores.11.2.3356-3372.

[41] L. Leng *et al.*, "An overview on engineering the surface area and porosity of biochar," *Science of the Total Environment*, vol. 763, p. 144204, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144204.

[42] S. M. Yakout, "Physicochemical Characteristics of Biochar Produced from Rice Straw at Different Pyrolysis Temperature for Soil Amendment and Removal of Organics," *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences*, vol. 87, no. 2, pp. 207–214, Jun. 2017, doi: 10.1007/S40010-017-0343-Z.

[43] S. Li, J. Lü, T. Zhang, Y. Cao, and J. Li, "Relationship between biochars' porosity and adsorption of three neutral herbicides from water," *Water Science and Technology*, vol. 75, no. 2, pp. 482–489, 2017, doi: 10.2166/wst.2016.535.

[44] A. Hernández-Cázares, N. Real-Luna, I. Delgado-Blancas, and J. Bautista-Hernández, J] Velasco-Velasco, "Residuos Agroindustriales Con Potencial De Compostaje," *Agroproductividad*, vol. 9, no. 8, pp. 10–17, 2016.

[45] L. Jiménez, M. Baquero, and J. Díaz, "CARBONIZADOS DE ORIGEN VEGETAL (COV) PARA LA GENERACIÓN DE ANTROPOSOLES. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA," *Revista Colombia de Química*, vol. 39, no. 2, pp. 177–190, 2006.

[46] A. J. Ashworth, S. S. Sadaka, F. L. Allen, M. A. Sharara, and P. D. Keyser, "Influence of Pyrolysis Temperature and Production Conditions on Switchgrass Biochar for Use as a Soil Amendment," *Bioresources*, vol. 9, no. 4, pp. 7622–7635, Oct. 2014, doi: 10.15376/biores.9.4.7622-7635.

[47] A. Urien Pinedo, "Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual," Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

[48] L. Milena, B. Moreno, P. Alexandra, and A. Díaz, "Evaluación Del Biochar E Hidrochar Como Medios Para Captura De Carbono En El Suelo," Universidad de La Salle, 2017. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/710

[49] L. Hua, Z. Lu, H. Ma, and S. Jin, "Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil," *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 941–946, Oct. 2014, doi: 10.1002/ep.11867.

[50] G. K. M. M. Rahman *et al.*, "Biochar and Organic Amendments for Sustainable Soil Carbon and Soil Health," in *Carbon and Nitrogen Cycling in Soil*, R. Datta, R. S. Meena, S. I. Pathan, and M. T. Ceccherini, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 45–85. doi: 10.1007/978-981-13-7264-3_3.

[51] J. Cooper *et al.*, "Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions," *Agric Ecosyst Environ*, vol. 295, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.agee.2020.106882.

[52] M. F. Benimeli *et al.*, "EL NITRÓGENO DEL SUELO," 2019. [Online]. Available: www.edafologia.com.arwww.edafologia.org

[53] A. Escalante Rebolledo *et al.*, "Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo," *Terra Latinoamericana*, vol. 34, no. 3, pp. 367–382, 2016.

[54] J. H. Windeatt, A. B. Ross, P. T. Williams, P. M. Forster, M. A. Nahil, and S. Singh, "Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment," *J Environ Manage*, vol. 146, pp. 189–197, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.jenvman.2014.08.003.

[55] U. Sadowska, I. Domagała-Świątkiewicz, and A. Żabiński, "Biochar and Its Effects on Plant–Soil Macronutrient Cycling during a Three-Year Field Trial on Sandy Soil with Peppermint (Mentha piperita L.). Part I: Yield and Macro Element Content in Soil and Plant Biomass," *Agronomy*, vol. 10, no. 12, p. 1950, Dec. 2020, doi: 10.3390/agronomy10121950.

[56] A. A. Karim *et al.*, "Enrichment of primary macronutrients in biochar for sustainable agriculture: A review," *Crit Rev Environ Sci Technol*, vol. 52, no. 9, pp. 1449–1490, May 2022, doi: 10.1080/10643389.2020.1859271.

[57] S. Rajkovich, A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, A. R. Zimmerman, and J. Lehmann, "Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil," *Biol Fertil Soils*, vol. 48, no. 3, pp. 271–284, 2012, doi: 10.1007/s00374-011-0624-7.

[58] S. López Zawada and Y. Moreno Ospina, "POTENCIALIDADES AGROINDUSTRIALES Y AMBIENTALES DEL BIOCARBÓN A PARTIR DE LA PULPA DE CAFÉ COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR," Universidad Tecnológica de Pereira, 2020. [Online]. Available: http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf

Preliminary evaluation of the content of heavy metals in rural aqueducts of the district of Tonosí, province of Los Santos, Panama

Evaluación preliminar del contenido de metales pesados en acueductos rurales del Distrito de Tonosí, provincia de Los Santos, Panamá

Dina Henríquez-Rivera
Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
https://orcid.org/0000-0002-4699-590X

Kathia Broce
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
https://orcid.org/0000-0003-2845-9350

Jorgre Olmos
Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
jorge.olmos@utp.ac.pa

Yahaira Espinosa
Facultad de Ciencias Naturales Universidad de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
yahaira_yr@hotmail.com

***Abstract*— Heavy metals may be required by living organisms as micronutrients while others have no equivalent role and are harmful even at very low concentrations. Its wide distribution in nature is one of the causes of great impacts on human health. In Panama, 20% of the population does not receive potable water and must resort to rural aqueducts that obtain water from surface catchments or from underground aquifers that are managed by the community itself. Of these, the quality of the water supplied by the rural aqueducts is unknown, because the Technical Regulation DGNTI-COPANIT 23-395-99, which regulates the characteristics of drinking water in the country, does not apply to these. By not knowing the quality, the presence of contaminants such as heavy metals, pathogens and other types of microorganisms is also a concern. The purposes of this study are: to characterize the content of heavy metals in rural aqueducts of the District of Tonosí, to determine the presence of organisms in the waters of these rural aqueducts through ATP testing and to select sites for a future abundance characterization study distribution and diversity of heavy metal resistance genes present in the microbiome of the groundwater sources that supply the rural aqueducts of the District of Tonosí, using a metagenomic approach.**

Keywords— heavy metals, water, groundwater, water for human consumption, rural aqueduct.

***Resumen* —** Los metales pesados pueden ser requeridos por el organismo como micronutrientes mientras que otros no tienen un papel equivalente y son perjudiciales incluso en concentraciones muy bajas. Su amplia distribución en la naturaleza es uno de los causantes de grandes impactos en la salud humana. En Panamá, el 20% de la población no recibe agua potabilizada y debe recurrir a acueductos rurales que obtienen el agua de captaciones superficiales o de acuíferos subterráneos que son gestionados por la propia comunidad. De estos se desconoce la calidad del agua suministrada por los acueductos rurales, debido a que en estos no se aplica el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99 el cuál regula las características del agua potable en el país. Al desconocer la calidad, también se desconoce la presencia de contaminantes como metales pesados, patógenos y otro tipo de microorganismos es una preocupación. Los fines de este estudio son: caracterizar el contenido de metales pesados en acueductos rurales del Distrito de Tonosí, identificar valores de contenido de metales pesados por encima de la norma, comparar estos resultados con la normativa de otros países y determinar la presencia de organismos en las aguas de estos acueductos rurales a través de prueba de ATP.

Palabras claves —metales pesados, agua, agua subterránea, agua consumo humano, acueducto rural.

I. Introduction

Los metales pesados pueden definirse como un grupo de metales cuya densidad atómica es superior a 5 g/cm^{-3}. Algunos son requeridos por el organismo como micronutrientes mientras que otros no tienen un papel equivalente y son perjudiciales para los organismos incluso en concentraciones muy bajas [1]. Su amplia distribución en la naturaleza es uno de los causantes de grandes impactos en la salud humana. Aunque se asocia generalmente a perturbaciones antropogénicas como la urbanización y la industrialización; su presencia en cuerpos de agua y otras matrices puede ser natural. Las fuentes naturales incluyen volcanes, degradación de minerales e incendios forestales, evaporación del suelo y la superficie del agua [2].

En Panamá, el 20% de la población no recibe agua potabilizada y debe recurrir a acueductos rurales que obtienen el agua de captaciones superficiales o de acuíferos subterráneos que son gestionados por la propia comunidad. De estos se desconoce la calidad del agua suministrada por los acueductos rurales, debido a que en estos no se aplica el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99 el cuál regula las características del agua potable en el país. Al desconocer la calidad, también se desconoce la presencia de contaminantes como metales pesados, patógenos y otro tipo de microorganismos es una preocupación.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00073

La Península de Azuero, ubicada en el suroeste de Panamá, es una región caracterizada por ser una zona de subducción intraoceánica. Fue en el Cretácico tardío cuando inició la actividad volcánica en esta zona como resultado de la subducción de la placa de Farallón debajo de la placa del Caribe. "Por lo general, los arcos volcánicos antiguos relacionados con las zonas de subducción intraoceánica no se conservan, porque se encuentran en áreas de difícil acceso o cubiertos por material de arco volcánico moderno. Sin embargo, en la península de Azuero se mantiene una sección completa del arco volcánico" [3].

Los acuíferos del área de la formación Tonosí se caracterizan por ser continuos o discontinuos de productividad limitada, con una calidad química del agua variable, constituidos por depósitos marinos de naturaleza clástica y con granulometría predominante en el orden de limos y arcillas [4].

Al desconocer la calidad, también se desconoce la presencia de contaminantes como metales pesados, patógenos y otro tipo de microorganismos que son ingeridos por los usuarios con potencial para causar serios problemas de salud.

La necesidad de tomar decisiones responsables en cuanto al agua apta para consumo humano, incluye disponer de datos confiables y actualizados sobre la información base de múltiples variables que permitan cuantificar y determinar los efectos de la misma sobre la salud de sus consumidores.

Los fines de este estudio son: caracterizar el contenido de metales pesados en acueductos rurales del Distrito de Tonosí, identificar valores de contenido de metales pesados por encima de la norma, comparar estos resultados con la normativa de otros países y determinar la presencia de organismos en las aguas de estos acueductos rurales a través de prueba de ATP.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación y Características Básicas los sitios de muestreo

El estudio se realizó en el distrito de Tonosí, ubicado al sudoeste de la península de Azuero, en las Tierras Altas de la provincia de Los Santos, aunque la población vive principalmente en el valle de Tonosí. El clima corresponde a tropical húmedo con estación seca prolongada, con abundantes lluvias en el invierno y muy seco en el verano. Es cálido, con temperaturas medias de 27º a 28º C. Los totales pluviométricos anuales, siempre inferiores a 2.500mm son los más bajos en todo el país. La estación seca presenta fuertes vientos, hay baja humedad y fuerte evaporación. El distrito de Tonosí posee dos tipos de clima: tropical húmedo, con influencia del monzón y tropical de sabanas [5].

La superficie total de este Distrito es de 1286.5 km^2. Por su extensión, es el distrito más grande de la provincia de Los Santos. El Valle de Tonosí se encuentra rodeado de montañas. El distrito de Tonosí posee un relieve compuesto por:

- Regiones Montañosas.
- Montañas de origen ígneo.
- Montañas producto de apilamiento de emanaciones e instrucciones magmáticas.
- Regiones bajas y planicies litorales.

B. Diseño de la investigación y tipo de muesta

La investigación es de tipo descriptiva y de corte transversal. Para la selección de la muestra se utilizó un muestro intencional de una población de 50 acueductos rurales con Juntas Administradoras de Agua (JAAR) registrada en el Ministerio de Salud (MINSA).

El primer criterio de selección es que la fuente de agua del acueducto sea aguas subterráneas. Sin embargo, la mayoría de las JAAR han cambiado a captaciones superficiales. Reduciendo la muestra en 12 pozos tanto privados como comunitarios y 7 muestras de acueductos de captación de aguas superficiales a los cuales se les realizó la prueba de ATP y análisis de metales pesados.

Los puntos de muestreos se encuentran en 10 corregimientos, los cuales a su vez pertenecen a las cuencas hidrográficas 122, 124 y 126 cuyos datos se muestran en la tabla 1.

TABLA I. CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEL DISTRITO DE TONOSÍ, PROVINCIA DE LOS SANTOS.

N° de Cuenca	Cuenca Hidrográfica	Río Principal	Extensión (km)	Área (km^2)
122	Cuenca hidrográfica ríos entre el San Pedro y el Tonosí	Quebro	40.40	2467.00
124	Cuenca hidrográfica Río Tonosí	Tonosí	91.00	716.80
126	Cuenca hidrográfica ríos entre el Tonosí y La Villa	Guararé	45.00	2170.00

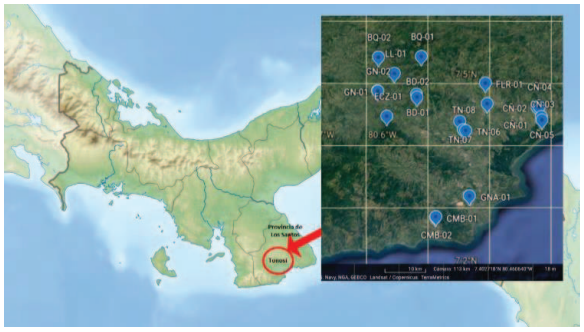
Fuente: EMPRESA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA, S.A. (ETESA).

Las coordenadas geográficas de los puntos de muestreos se encuentran en la tabla 2.

TABLA II. COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LOS SITIOS DE MUESTREO.

CORREGIMIENTO	ID	LATITUD	LONGITUD
El Bebedero	BD-01	7.46508333	80.5183056
	BD-02	7.460177	80.517427
Alto de Güera	BQ-01	7.52530556	80.5103333
	BQ-02	7.52461111	80.5799167
La Tronosa	LL-01	7.49847222	80.5541111
	GN-01	7.47047222	80.5815833
	GN-02	7.46997222	80.5809722
El Cacao	ECZ-01	7.42936111	80.5661111
El Cortezo	ECC-01	7.44969444	80.4035556
Flores	FLR-01	7.48288889	80.4063611
Cambutal	CMB-01	7.26708333	80.4873333
	CMB-02	7.26772222	80.4867778
Guánico	GNA-01	7.30125	80.4324722
Cañas	CÑ-01	7.44452778	80.3224722
	CÑ-02	7.44430556	80.3228889
	CÑ-03	7.42347222	80.3145556
	CÑ-04	7.44458333	80.3189444
Tonosí	TN-6	5.067735	78.1102218
	TN-7	5.079545	78.126487
	TN-8	5.0740.88	78.124547

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

Fig. 1. *Lugares de muestreo Distrito de Tonosí, Provincia de los Santos.* .

C. Toma de muestras y análisis in situ y de laboratorio

El muestreo de agua se realizó durante los días 2 y 3 de junio de 2022. El muestreo de agua para la determinación de los parámetros físicos y químicos se realizó por duplicado en botellas de un litro de capacidad previamente lavadas con agua desionizada. Para las pruebas de ATP se tomaron 100 µl de agua con el dispositivo Aquasnap® y la muestra fue analizada con el luminómetro EnSURE® Touch de Hygiena.

Para los análisis de metales pesados con el equipo de espectrometría de fluorescencia de rayos X de reflexión total (TXRF). Se tomó una alícuota de 1 ml de muestra, a la cual se le añade 10µl del estándar interno de galio (1.0 g L−1, Sigma-Aldrich), posteriormente se homogenizan un vortex y con una micropipeta se toman 5 µL de la muestra homogeneizada y se pipetean en el centro de un porta muestras de vidrio de acrílico. El disco con la muestra se seca en un plato caliente a una temperatura de 51 ºC y luego se coloca en el cassette para ser introducido dentro del euipo de TXRF. EL equipo fue calibrado con una muestra estándar de multielemental en disco de cuarzo (Bruker Nano GmbH).
Estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Panamá con equipo perteneciente al proyecto PFID-INF-2020-48 “Morbilidad vs la calidad del agua para consumo humano en Tonosí: un estudio piloto.

Para los parámetros químicos: conductividad eléctrica (CE), pH, y la temperatura (°C) del agua, se utilizó un equipo multiparámetro marca HACH. Determinación realizadas in situ, en vasos de precipitación de 600 ml, que fueron llenados con agua de las muestras, se dejó reposar 5 minutos y se realizaron tres lecturas por muestras.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores de temperatura oscilaron entre 24.5 °C y 27.10 °C, la conductividad entre 103 y 709 µScm^{-1}, observándose los valores más altos en aguas subterráneas. En [6] describen valores elevados en cuanto a la conductividad eléctrica, en reservorios de regiones semi- áridas del Brasil, especialmente d las temporadas de lluvia El rango de pH de las muestras fue de 6.66 a 7.80, encontrándose dentro los valores característicos para aguas naturales las cuales presentan valores con cierto carácter básico [7]

Los parámetros temperatura, pH, conductividad eléctrica y presencia de ATP en agua se muestran en la tabla 3.

TABLA III. PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS MEDIDOS EN LAS MUESTRAS DE AGUA.

	ID	pH	CONDUCTIVIDAD (µScm^{-1})	RLU	ºT
Captación Superficial	**BD-01**	6.69	112.7	17	24.50
	BD-02	6.76	103.7	64	24.43
	GN-02	7.55	222.7	17	7.66
	ECZ-01	6.98	190.3	38	6.98
	ECC-01	7.14	239.3	69	7.14
	FLR-01	7.53	269.0	15	7.53
	CMB-01	6.96	254.3	33	6.96
Agua subterránea	**BQ-02**	7.66	533.0	0	7.66
	LL-01	7.44	230.3	49	7.44
	GN-01	7.01	246.9	21	7.01
	CMB-02	7.41	313.0	27	7.41
	GNA-01	7.12	606.0	232	7.12
	CÑ-01	7.06	290.0	26	7.06
	CÑ-02	6.75	480.3	17	6.75
	CÑ-03	6.93	288.3	14	6.93
	CÑ-04	7.62	394.0	337	7.62
	TN-6	7.39	398.7	27	7.39
	TN-7	7.43	708.3	0	7.43
	TN-8	7.37	708.7	0	7.37

Fuente: Elaboración propia.

Los metales identificados en las muestras son: Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu y Zn.

TABLA IV. Resultados para Metales Pesados según la técnica de TXRF.

	ID	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
Captación Superficial	**BD-01**	12.690	0.054	0.149	0.045	0.144	0.000	0.041	0.023
	BD-02	5.550	0.000	0.045	0.000	0.159	0.007	0.020	0.019
	GN-02	10.290	0.073	0.023	0.029	0.666	0.103	2.617	0.192
	ECZ-01	8.660	0.038	0.061	0.012	0.279	0.008	0.021	0.026
	ECC-01	7.880	0.011	0.024	0.000	0.026	0.003	0.006	0.008
	FLR-01	27.030	0.023	0.036	0.008	0.116	0.000	0.023	0.021
	CMB-01	11.730	0.000	0.050	0.003	0.077	0.000	0.014	0.032
Agua subterránea	**BQ-02**	17.170	0.000	0.042	0.008	0.042	0.000	0.008	0.008
	LL-01	495.000	2.200	2.600	0.000	5.4	0.950	1.980	0.900
	GN-01	22.540	0.016	0.032	0.014	0.105	0.008	0.020	0.024
	CMB-02	12.030	0.141	0.024	0.000	0.03	0.002	0.009	0.066
	GNA-01	24.240	0.013	0.035	0.022	0.145	0.000	0.705	0.022
	CÑ-01	8.670	0.050	0.039	0.011	0.247	0.005	0.023	0.021
	CÑ-02	11.150	0.000	0.000	0.004	1.049	0.000	0.006	0.011
	CÑ-03	13.450	0.037	0.028	0.014	0.121	0.006	0.014	0.006
	CÑ-04	23.790	0.000	0.097	0.021	0.177	0.021	0.107	0.016
	TN-6	25.410	0.045	0.037	0.013	0.185	0.010	0.118	0.017
	TN-7	24.520	0.024	0.010	0.208	0.267	0.004	0.079	0.055
	TN-8	29.670	0.000	0.016	0.086	0.052	0.000	0.011	0.020

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el test de Shapiro-Wilks para todos los datos con el fin de identificar el tipo de distribución de los mismos para la aplicación de una prueba de correlación. plantea la hipótesis nula que una muestra proviene de una distribución normal. Se seleccionó un nivel de significancia de 0,05. La hipótesis nula indica que la distribución es normal mientras que la alternativa que sostiene que la distribución no es normal. Para esta prueba se trabajaron las siguientes hipótesis:

- H0: La variable de la cual se extrajo la muestra sigue una distribución Normal.
- Ha: La variable de la cual se extrajo la muestra no sigue una distribución Normal.

TABLA V. PRUEBA DE SHAPIRO-WILKS PARA LAS MUESTRAS DE AGUAS DE CAPTACION SUPERFICIAL.

VARIABLE	W	valor-p (bilateral)	alfa
pH	0.895	0.3010	0.05
Conductividad	0.873	0.1980	0.05
RLU	0.848	0.1180	0.05
Ca	0.780	**0.0260**	0.05
Ti	0.921	0.4760	0.05
V	0.741	**0.0100**	0.05
Mn	0.835	0.0890	0.05
Fe	0.776	**0.0230**	0.05
Ni	0.529	**<0.0001**	0.05
Cu	0.463	**0.0000**	0.05
Zn	0.564	**<0.0001**	0.05

Fuente: Elaboración propia.

TABLA VI. PRUEBA DE SHAPIRO-WILKS PARA LAS MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRANEAS

Variable	W	valor-p (bilateral)	alfa
pH	0.937	0.456	0.05
Conductividad	0.902	0.168	0.05
RLU	0.606	**0**	0.05
Ca	0.372	**<0.0001**	0.05
Ti	0.374	**<0.0001**	0.05
V	0.353	**<0.0001**	0.05
Mn	0.571	**<0.0001**	0.05
Fe	0.443	**<0.0001**	0.05
Ni	0.344	**<0.0001**	0.05
Cu	0.505	**<0.0001**	0.05
Zn	0.384	**<0.0001**	0.05

Fuente: Elaboración propia.

Las lecturas de pH, conductividad eléctrica, RLU, Ti y Mn de las muestras de captación de agua superficial y de pH, conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea presentan el valor-p mayor que el nivel de significación alfa=0.05, por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

En cuanto los valores de Ca, V, Fe, Ni, Cu y Zn de las muestras de captación de aguas superficiales y los valores de Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu y Zn de las muestras de agua subterránea muestran un valor-p computado menor que el nivel de significación alfa=0.05, por lo que se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

Posteriormente se realizó un análisis de correlación de las muestras utilizando el índice de Spearman ya que no todas las muestras presentan una distribución normal.

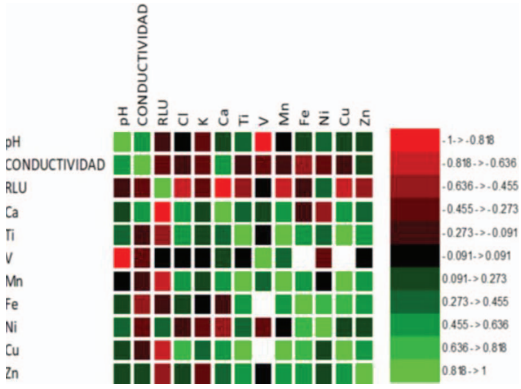


Fig. 2. *Matriz de correlación para las muestras de agua de captacion superficial.*

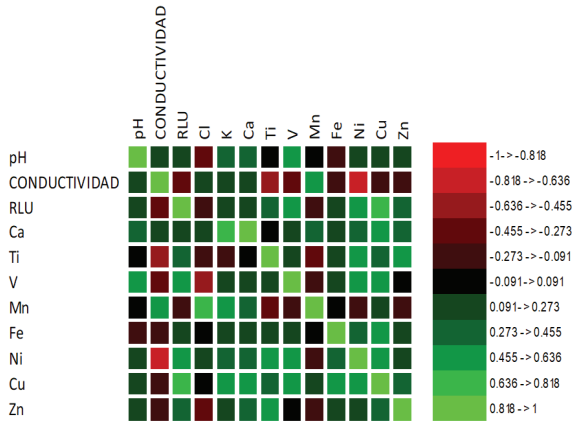


Fig. 3. Matriz de correlación para las muestras de agua subterránea.

En las muestras de captación de aguas superficiales se presenta una correlación positiva entre las siguientes variables:

- RLU- Ca

Y una correlación negativa entre el pH y el Vanadio.

En las muestras de aguas subterráneas se presenta una correlación positiva entre las siguientes variables:

- Conductividad eléctrica – Ti – Ni
- RLU – Cu
- Ca-Cu
- Ti-Zn
- Ni-Cu

Tal y como se indica en [8], la correlación positiva se refiera a que si al crecer los valores de A lo hacen los de B, la relación es positiva; si al crecer los valores de A disminuyen los de B, la relación es negativa.

Con respecto a los límites de metales de acuerdo a las normativas para metales en agua destinadas para consumo humano, se realizó una comparación entre la normativa panameña, con los límites de la Organización Mundial de la Salud, la Unión Europea y con las normativas de otros 19 países de América [9]. Tres de los sitios de muestreo para agua de captación superficial tuvieron presencia de: Mn, Fe,

Ni y Cu. En las muestras de agua subterránea, ocho de los sitios presentaron valores por encima de la normativa para: Cu, Fe, Ni y Mn.

TABLA VII. VALORES POR ENCIMA DE LA NORMA SEGÚN [9].

TIPO DE MUESTRA	ID	Mn	Fe	Ni	Cu
Captación de agua superficial	**BD-01**	0.045			
	GN-02		0.666	0.103	2.617
	ECZ-01		0.279		
Agua subterránea	**LL-01**		5.4	0.95	1.98
	GNA-01				0.705
	CÑ-01		0.247		
	CÑ-02		1.049		
	CÑ-04			0.021	
	TN-6		0.185		
	TN-7	0.208	0.267		
	TN-8	0.086			

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla VIII, presentamos el código de colores utilizado en la tabla VI.

TABLA VIII. PAISES CUYAS NORMATIVAS ES INCUMPLIDA POR LOS SITIOS DE MUESTREOS.

COLOR	PAISES
	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, El Salvador, México, Uruguay, Honduras, Canadá y Estados Unidos.
	Unión Europea, El Salvador, Canadá y Estados Unidos.
	Guatemala.
	OMS, Unión Europea, Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Chile, Ecuador, El Salvador, Guatemala, México, Nicaragua, Perú, República Dominicana, Uruguay, Venezuela, **Panamá**, Canadá y Estados Unidos.
	Unión Europea.
	OMS, Unión Europea, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Nicaragua, Perú, Venezuela y **Panamá**.
	OMS, Colombia, El Salvador, Guatemala, Perú, Venezuela, Honduras y **Panamá**.
	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Perú, República Dominicana, Uruguay, **Panamá**, Canadá y Estados Unidos.
	OMS, Unión Europea, Costa Rica, México, Nicaragua y Honduras.
	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, El Salvador, Perú, República Dominicana, Uruguay, **Panamá** y Canadá.

Fuente: [9]

Dentro de las normativas sobre presencia de metales en agua para consumo humano, el Cu, Mn y Ni son considerados como químicos inorgánicos de importancia para la salud. Pero sólo el cobre se considera un contaminante inorgánico. El Fe de es considerado una sustancia que puede causar molestias entre los usuarios pero es peligroso para la salud [9].

De acuerdo con Contaminantes inorgánicos, Cu, La mayoría de las aguas superficiales y subterráneas del mundo que se utilizan para beber contienen cobre, pero en cantidades que no ofrecen riesgo para el ser humano.

La presencia de Mn y Fe en el agua potable causan problemas estéticos y problemas operativos como olor y color marrón. De acuerdo con la literatura, la exposición al manganeso puede dañar las funciones del sistema nervioso, incluyendo lesiones irreversibles que provocan un síndrome similar al Parkinson conocido como manganismo [10].

Las metodologías estandarizadas para análisis de metales en diferentes matrices se encuentran descritas en [11], debido a su capacidad de detectar bajos niveles, las más utilizadas son: la Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) y la Espectrometría de Emisión por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

Aunque la TXRF no es una metodología estándar, de acuerdo con [12] es una técnica competitiva en comparación con AAS o ICP-OES y según [13], presenta "criterios de cuantificación aceptables en términos de límite de detección/cuantificación, exactitud y precisión". Algo también presentado por [14] indicando que existe una equivalencia razonable entre los resultados de análisis de metales por TXRF e ICP-OES.

CONCLUSIONES

Es escaza la literatura que trate las características de las aguas subterráneas dentro de la República de Panamá, especialmente del área de la provincia de Los Santos. Este estudio preliminar permitió identificar que no todos los acueductos rurales del distrito de Tonosí se abastecen de agua subterránea.

Dentro de los acueductos muestreados, se identificaron concentraciones de Cu, Fe y Ni que sobrepasaron en algunos de los sitios, el valor permitido por la normativa panameña. Mientras que Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu y Zn, Mn, Fe, Ni y Cu, sobrepasaron la normativa de otros países de América y la Unión Europea.

Las pruebas de ATP mostraron la presencia de organismos vivos en las muestras, pero en rangos seguros tanto para las muestras de captación de agua superficial y de aguas subterránea. Salvo en dos sitios identificados como pozos privados, pero estos no son utilizados para consumo humano, pero sí para uso agrícola, por lo que es importante no descartar su seguimiento.

A manera de ampliación, los sitios muestreados se mantendrán para futuros estudios de caracterización del riesgo ambiental de metales pesados en los sedimentos que rodean los acuíferos y las captaciones de agua superficial, mientras que, en los corregimientos de Alto de Güera, Cañas y Tonosí se realizarán estudios sobre la caracterización de abundancia, distribución y diversidad de genes de resistencia a metales pesados presentes en el microbioma de las fuentes de agua que abastecen los acueductos rurales del Distrito de Tonosí, debido a que son estos corregimientos los que aún mantienen el sistema de abastecimiento de pozos de agua subterránea para toda la comunidad,

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) para realizar esta investigación dentro del proyecto PFID-INF-2020-48 "Morbilidad vs la calidad del agua para consumo humano en Tonosí: un estudio piloto".

Agradecemos al financiamiento de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) y el Insitituto para la Formación y Aprovechamiento de los Recursos Humanos (IFARHU) como parte del Doctorado en

Biociencias y Biotecnología en convenio IFARHU-SENACYT-UTP-INDICASAT AIP.

Agradecemos al Ing. Daniel Nieto, del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) por su apoyo durante los muestreos.

Agradecemos al Sr. Hermes Dario Sánchez, por su valiosa colaboración como puente entre nosotros y las autoridades locales del distrito de Tonosí.

REFERENCIAS

[1] G. L.-R. J. F.-N. P. M.-M. I. B.-L. A. &. N. O. López-Abente, «Compositional analysis of topsoil metals and its associations with cancer mortality using spatial misaligned data,» *Environmental geochemistry and health,* pp. 40(1), 283-294, 2018.

[2] B. Z. Y. J. S. a. G. J. He, «Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity,» *Chinese Science Bulletin 58,* vol. 58, nº no. 2 , pp. 134-140, 2013.

[3] I. D. G.-G. A. G. M. C. a. E. C. Corral, «Sedimentation and volcanism in the Panamanian Cretaceous intra-oceanic arc and fore-arc: New insights from the Azuero peninsula (SW Panama),» *Bulletin de la Société Géologique de France ,* vol. 184, nº no. 1-2, pp. 35-45., 2013.

[4] V. Opolenko de Arjona, «Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, República de Panamá,» *Revista Geográfica de América Central,* nº 67, pp. 83-120, 2021.

[5] A. N. d. Ambiente, «Atlas Ambiental de Panamá,» Editora Novo Art S.A., Ciudad de Panamá, 2010.

[6] N. T. J. M. B. a. O. R. Chellappa, «Phytoplankton community and physical-chemical characteristics of water in the public reservoir of Cruzeta, RN, Brazil,» *Brazilian Journal of Biology ,* nº 68, pp. 477-494, 2008.

[7] J. M. Alfayate Blanco, M. N. González Delgado, C. Orozco Barrenetxea y A. y. R. V. F. J. Pérez Serrano, «Contaminación ambiental. Una visión desde la química: una visión desde la química,» Madrid, Thomson Editores, 2005, p. 71.

[8] R. M. L. C. T. P. M. M. O. A. P. A. a. A. M. C. Martínez Ortega, «El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización,» *Revista Habanera de Ciencias Médicas ,* vol. 8, nº No. 2, 2009.

[9] P. Truque, «Armonización de los estándares de agua potable en las Américas,» Organización de Estados Americanos, Washington DC, EE. UU, 2011.

[10] V. J. M. K. D. V. A. a. A. A. Z. Inglezakis, «Removal of iron and manganese from underground water by use of natural minerals in batch mode treatment,» *Desalination and Water Treatment ,* vol. 18, nº no. 1-3, pp. 341-346, 2010.

[11] Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation, Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, Washington DC: Lipps WC, Baxter TE, Braun-Howland E, editors, 2017.

[12] R. Fernández-Ruiz, «Espectrometría TXRF en las ciencias bioanalíticas: una breve revisión,» *Espectrometría de rayos X ,* vol. 51, nº (3), pp. 279-293, 2022.

[13] F. X. Y. D. A. y. J. A. Antosz, «El uso de fluorescencia de rayos X de reflectancia total (TXRF) para la determinación de metales en la industria farmacéutica,» *Revista de análisis farmacéutico y biomédico,* nº 62, pp. 17-22., 2012.

[14] F. Cataldo, «Análisis multielemento de un lixiviado de vertedero municipal con fluorescencia de rayos X de reflexión total (TXRF). Una comparación con los resultados analíticos de ICP-OES,» *Revista de química radioanalítica y nuclear,* vol. (1), nº 293, pp. 119-126, 2012.

On understanding the role of exoskeleton robots in hand rehabilitation: a brief review

Antonio Alberto Jaén Ortega
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
antonio.jaen@utp.ac.pa

Maria De Los Angeles Ortega Del Rosario
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
maria.ortega@utp.ac.pa

Per Hellström
Division of Intelligent Future Technologies
Mälardalen University
zunh@kth.se

Elaine Åstrand
Division of Intelligent Future Technologies
Mälardalen University
elaine.astrand@mdu.se

Mikael Ekström
Division of Intelligent Future Technologies
Mälardalen University
mikael.ekstrom@mdu.se

***Abstract*—Hand rehabilitation has been widely studied since it affects the life quality and independence of those affected. Hand impairment can be caused by several conditions, among them strokes and other cerebrovascular accidents, affecting the capabilities of those who survive them in performing the activities of daily living (ADL). Rehabilitation seeks to restore the ability of a person to perform these crucial ADL. There is a current trend in using robotic rehabilitation and other industry 4.0 tools since it can provide a safe, intensive, and task-oriented at a relatively low cost, which can be combined with other technologies such as virtual and augmented reality, BCI, haptics, and others. Moreover, it can provide accessibility in the face of current panoramas such as COVID-19. Hand exoskeleton robots are one of the most extended robotic devices for rehabilitation. However, a design adapted to the patient's needs is necessary to achieve their capability fully and succeed in rehabilitation. One of the main challenges is that several considerations and parameters affect these devices' design and the broad approaches that can be followed. This brief review aims to understand and empathize as a source of inspiration during the design process of hand exoskeleton robots for rehabilitation.**

Keywords—ADL, exoskeleton, hand exoskeleton robots, hand rehabilitation, stroke

I. Introduction

Rehabilitation processes aim to recover functions that have been lost in the physical, psychological, and social senses for various reasons. Strokes and other cerebrovascular accidents (CVA) are among the highest incidence cases where physical rehabilitation is necessary. Strokes occur when blood flow to the brain is interrupted long enough to cause brain cell death. Consequently, they can cause long-term disabilities in survivors [1], [2]. According to data from the World Stroke Organization (WSO), by 2019, more than 13 million new strokes were registered [3], mainly affecting men, meaning that one in four people over 25 will have a stroke in their lifetime.

In those patients who have suffered some type of stroke, the World Health Organization (WHO) estimates that these patients and their families are the ones who must face those actions that allow rehabilitation since the infrastructures and associated services do not currently comply with a robust system [4]. Within the Sustainable Development Goals, there is the WHO Rehabilitation Action 2030, which seeks to integrate rehabilitation as an integral part of universal health systems [5] framed in the SDG 3: "ensure a healthy life and promote well-being for all at all ages" [6, p. 3]. In addition, a series of complementary actions are listed, such as including rehabilitation at different levels, multidisciplinary actions, community and hospital rehabilitation services, the inclusion of units in hospitals that can attend to complex needs in patients, strong financial support, rehabilitation coverage in medical insurance services, and financial assistance both to those who require rehabilitation, and to those who attend it.

Various methods can be carried out to achieve rehabilitation. The most traditional ones are based on leaning on a person who physically performs and stimulates the patient's movements. However, the health field is currently beginning to rely on industry 4.0 tools, such as robotics, to stimulate these movements [7]–[9]. These robotic devices can replicate the treatment applied manually by the physiotherapist [10], achieving the desired motor recovery in the patient. Their use is a trend since it can provide a safe, intensive, and task-oriented at a relatively low cost, which can be combined with other technologies such as virtual and augmented reality, BCI, haptics, and others [7]. There are different methods by which robots have been integrated into the rehabilitation of patients of various kinds [11]. One way to make this link is through brain-computer/machine interfaces (BCI/BMI), which can be used as communication systems that translate user intentions into commands to control external devices [1], [12], [13]. These have the potential to promote cortical plasticity after stroke. Some research has shown that these methods improve patients' motor skills [14].

Among these systems, exoskeletons have been developed to promote controlled movement in various body parts. According to [2], "an exoskeleton is a mechanical, passive or actuated structure, which is designed to interact with one or more parts of the body" (p. 18). Instead, [11] defines exoskeleton robots for rehabilitation as "portable electromechanical devices that have been developed as augmentative devices to improve the user's physical performance or as orthopedic devices for gait rehabilitation or locomotion assistance". The actions between the exoskeleton and the body can occur directly or indirectly, and this impacts design choices, leading to a wide variety of exoskeletons, as they can be cataloged considering different factors.

Moreover, rehabilitation seeks to restore the ability of a person to perform crucial daily activities without assistance, known as activities of daily living or ADL [15], [16]. From the body, the hand is frequently the most used part to execute the ADLs. Therefore, a motion restriction results in a loss of function and, thus, quality of life [17]. In the literature, exoskeletons have been widely used for hand rehabilitation and adapted to different hand morphologies through various adjustment mechanisms embedded in the exoskeleton, materials, shapes, and others [18]–[21].

This study explores a brief analysis of the literature concerning hand functions, the causes of hand impairments, rehabilitation, and the use of robotic devices, such as exoskeletons. This review aims to understand and empathize

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00074

as a source of inspiration during the design process of hand exoskeleton robots for rehabilitation.

II. HAND REHABILITATION DEVELOPMENT FRAMEWORK

A. Activities of Daily Living (ADL)

An adequate description and classification of these activities, from a kinematic point of view, has been widely discussed in the literature since it represents an opportunity for improvements in different fields such as rehabilitation and physiotherapy, both traditional and robotic; improvement in the grip of robots; improvements in the simulation of hand functions, among others [15], [17], [22], [23]. In this sense, some studies have focused on the measurement of the degrees of freedom (DOF); however, direct conversion of the DOF of one hand to robotic rehabilitation alternatives is impractical due to the high complexity [24], [25], [25], [26] and the weight that it could represent, whether it is an exoskeleton, or even a prosthetic hand [26].

Different hierarchies and taxonomies have been proposed over the past years. For instance, the GRASP taxonomy proposed by [28], is based on the hand grip functions during the execution of several tasks. This taxonomy is an update of the taxonomies previously proposed by [27], [29], [30], among others, adding some 22 base taxonomies and serving as a broad panorama for the understanding and execution of robotics for hand rehabilitation. The authors define the grip as: "any static posture of the hand with which an object can be held safely with one hand, regardless of the hand's orientation" [28]. In this taxonomy, the columns classify actions according to their need for power or precision. From there, it proposes a subclassification if the opposition were: the palm of the hand, the back, or one side of it.

Other taxonomies that can serve as guides are those of [26] that detail 23 ADLs related to the hand and those of [15] based on the manipulation tasks and the level of rotation necessary for these tasks to be executed. Moreover, the ADLs have been widely classified into various taxonomies that allow identifying the key activities a person must perform to be autonomous in their functions. From this rehabilitation perspective, these allow identification of the functions and, in particular, of the range of movement that the hand should have [15]–[17], [27]. These are often related to certain hand functions such as prehensile and non-prehensile functions, grasping and pinching functions, as well as the opposite function of the thumb [31]. Furthermore, these can be developed in spherical, planar, or circular movements, which depend on the object's shape and how it is to be held [32].

B. Stroke and rehabilitation

The performance of all ADLs requires total capacity for movement and use of the upper extremities, particularly the hands. The reduction in these capacities currently affects millions of people, which translates into a reduced quality of life [33]. Among the causes, it can be included strokes, brain trauma, spinal cord injury, and cerebral palsy, among other neurological disorders [13], [34]–[36], which affect chronic disorders of the central nervous system (CNS).

For those surviving these incidents, several conditions can be observed, such as tremors, sensory loss, spasticity, weakness, loss of coordination in the extremities, or limited to no movement capacity [37]. These, in turn, can cause in the patient an alteration in the viscoelastic properties of the tissue in the joints, problems in muscle activation, and others that lead to increased stiffness in the joints [36], also giving, as a result, reduced motor skills [38].

Strokes commonly occur in cortical regions where the blood supply is provided by the middle cerebral artery, supplying the surfaces of the frontal, parietal, and temporal lobes. They can be of different types, such as ischemic and hemorrhagic (intracerebral and subarachnoid hemorrhage) [3]. Its consequences are also differentiated depending on the hemisphere that is affected. According to data presented by [39] and compiled by [40], the effects of strokes in one hemisphere affect mobility in the opposite hemisphere (hemiparesis). Thus, one of the common sequelae of strokes in the left hemisphere is right hemiplegia [2].

An interruption in blood supply basically causes neuronal death in those who suffer, which translates into some sequelae such as neurological deterioration and a reduction in motor functions [35], [41]. Upper extremity hemiplegia is one of the most common conditions in these patients, affecting two-thirds of their population [42]–[44].

Access to a good rehabilitation process after suffering some type of stroke is one of the recommendations of the World Health Organization [3], which includes both physical, occupational, speech, and psychological [4]. Physical therapy is essential for improving motor skills and, therefore, their quality of life [44].

Due to the significant impact of this type of accident and its implications on people's quality of life, rehabilitation has been widely studied in recent decades. In this sense, neurorehabilitation studies show that the tissue of the central system of the brain is plastic and that the connections between neurons can be re-established through repetitive and intense training. It is believed that this motor training can build a new neural network in the unaffected cortical areas, replacing the functions that were performed by the affected areas [45]–[49].

According to [50], stroke rehabilitation is a "progressive, dynamic and goal-oriented process that aims to allow a person with a disability to reach their physical, cognitive, emotional, communicative and/or social functional level optimal": (p.p. 4). The criteria for admission to rehabilitation are given depending on the regulations of each place. However, these include aspects such as the time elapsed since the stroke, the types of functions maintained after the stroke, and access to rehabilitation, among others [40], [50], generally requiring active intervention and continuity in multiple disciplines, including physical, occupational, speech, orthotics and prosthetics therapy, in some cases intensively for up to three hours of therapy daily, at least five days a week. Regarding the elapsed time, the first phase after a stroke, between the first days and weeks, is called the acute phase; this phase is followed by a relearning or plateau phase, called the chronic phase, in the months after the stroke [2]. The most significant advances in the recovery of stroke patients regularly occur at this stage [51].

Furthermore, an adequate determination of the most beneficial therapy for a patient will be influenced by aspects such as demographics (age, gender, ethnicity,...), diagnosis (type of stroke, affected hemisphere), clinical time (stage in which where the patient is after the stroke), remaining functions (sensation, motor capacity, spasticity), among others [9]. According to [2] and compiling the works of [51], [52], the key factors for effective rehabilitation are: intensity of training, involvement, and motivation of the patient,

minimum necessary ad-hoc assistance for failure reduction, activities with specific tasks for the fulfillment of direct goals, progressive, personalized and challenging practice, and an early participation.

Different types of therapy are currently performed to improve these problems in the upper limbs, including restricted induced movement therapy and intensive bimanual therapy [53]. In recent years, robot-assisted therapy has gained significant relevance since it allows the repetitive movements necessary to address plasticity to be precisely and objectively treated [14], [54], [55], with mechanical help to perform these movements [44] and where the limb performs actions passively [56]. These are also currently carried out in conjunction with virtual reality that allows training in a more pleasant and friendly environment for the patient than the one perceived in a hospital, in addition to adapting to situations where the patient perceives the exercise of the desired activity, promoting reward-based training [57]–[59].

III. Hand Rehabilitation

In hand rehabilitation, the therapy should include training in different movements such as extension/flexion of the wrist, pronation/supination, force, precision and lateral grip, and individual control of each finger, among others compatible with the ADLs [30], [60]. The devices adapted to these therapies can be simple or complex, depending on the DOFs that are developed for each training.

In recent decades, robotic systems for rehabilitation have integrated biological signals as input, which allows a greater understanding of the behavior and progress of patients. Robotic devices can be categorized as exoskeletons and end-effectors, where the former directly controls the target joints, while the latter do so in the distal parts of their limbs [54], [56].

According to the main requirement of an exoskeleton, it can be classified as an augmentation exoskeleton to increase the natural capacity of the user's body, passive, usually in a master-slave configuration to replicate the actions of the human operator, and as a substitution exoskeleton, to recreate the actions that correspond to a non-functional body part [2].

Some biological signals emitted by the body can be used to control these robotic devices. The most common types are the electromyogram (EMG), electrooculography (EOG), and electroencephalogram (EEG) [61]. These have gained high popularity as they are non-invasive techniques that capture the user's intention and allow training. In the EMG case, the sensing detects the muscles' electrical signals [62]. If the patient can still generate these signals, typically found in healthy people, these signals can help the exoskeleton generate the complementary trajectories that support the desired movement [63].

In the case of EEG, it can be supported by BCI or BMI to rehabilitate patients through exoskeletons. A brain-computer interface (BCI) or brain-machine interface (BMI) allows the development of state-level control of patients during their therapies. They allow direct communication between the brain and the device, bypassing some body-structured communication pathways [56]. These systems detect brain signals and translate them into commands executable by the device. This technique is widely used to detect brain signals through motor imagery (MI) practices due to its high temporal resolution, portability, and relatively low cost [64]–[66]. In the case of the EOG, the signals measured are from the cornea–retina, which are related to the voluntary horizontal eye movement [67]. It is generally used simultaneously as the EGG [68].

IV. Hand Exoskeletons

An extensive literature deals with the classification and impact of the study of exoskeletons as rehabilitation mechanisms. A bibliometric search by the co-occurrence of keywords was developed in all the literature indexed on Web of Science and SCOPUS as of May 7, 2022. From this, five clusters of interest can be distinguished in Fig. 1: the exoskeleton as a robot (pink), physical phenomena and devices associated with rehabilitation (green), anatomy (yellow), and stroke (purple). This bibliometric search was carried out with the support of the VOSviewer tool [69]. When designing exoskeletons, several factors may impact the selection strategies. For instance, [70] [8], [61], [71]–[73] have previously classified exoskeleton as a decision tool.

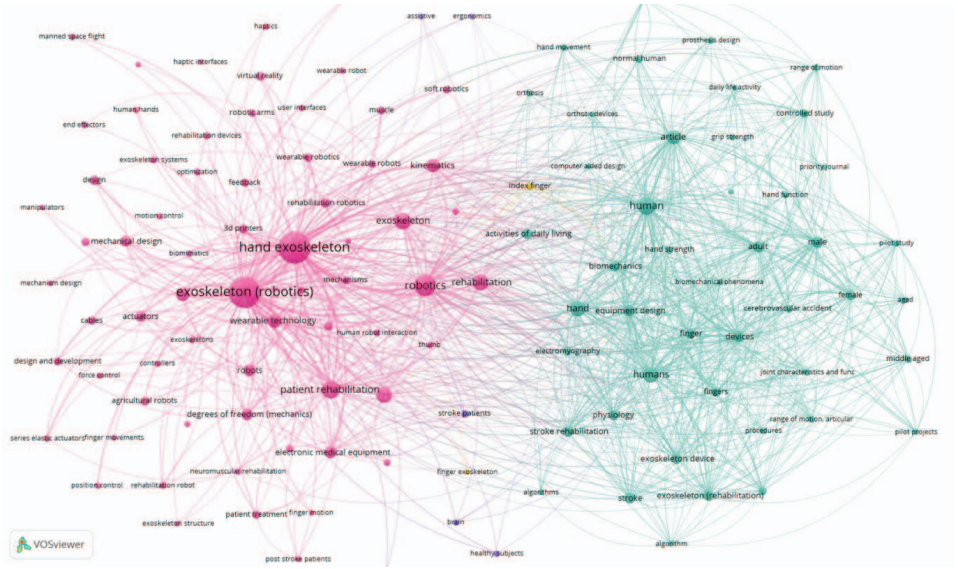


Fig. 1. Bibliometric analysis performed with VOSViewer of the literature review by May 7, 2022.

A. According to the mobility

Mobility-related aspects of a hand exoskeleton can be classified in terms of (i) the mobility in the hand, (ii) the mobility in the finger, and (iii) interaction points [70]. In a finger, the main movements are those of flexion and extension due to three bones: the proximal, middle, and distal phalanges [20], after which in the wrist, the metacarpus is used [74].

If one seeks to develop products involving hand movement, it is necessary to comply with its ergonomics and anthropometry. Anthropometric measurements of the hand are well known and widely studied since they can considerably vary due to aspects such as gender, race, age, nationality, and others [75], [76], [76]–[81].

Moital et al. [82] identified the hand movements according to their degree of complexity, from the least complex to the most complex. These were classified into the following groups: index extension and flexion only, middle finger flexion and extension, and general hand movement for ADLs). As described in previous sections, [15] classified these ADLs and their relationship with the use of the hand according to three categories: power grip, intermediate grip, and precision grip. Similarly, [83] classified six functional ADL tasks in patients. More recently, [84] developed a study on recognizing hand movement patterns for patients participating in post-stroke rehabilitation. In all these cases, the body's signal was collected through electromyography, which allows patterns to be recognized from the nerve and muscle cells that control motor functions [85].

Knowing the number of fingers, as well as the joints in such fingers that require assistance or rehabilitation is essential. This will be associated with the tasks to be achieved, as well as the needs of the user. Due to the high complexity of the hand, the differentiated control of all the fingers is also complex. Batzianoulis et al. [86] comment on the hypotheses that "the human being has managed to manage the 21 DOF related to hand movements, due to a reduction in the control variables operated by the central nervous system". In their study then, the authors delve into the implications of posture and precision achieved through exoskeletons for rehabilitation. McKenzie et al. [87] comment on the simplifications other authors have sought to address better finger control, where designers have opted for an approach of taking the DOF into account with a more practical sense. This has been achieved by reducing the operations performed by the hand to those related to ADL, or by ensuring that each DOF has an actuator, working with underactuated systems, or through the use of actuators made of soft and elastic materials, allowing a simpler and lighter system.

B. According to the grip

Many of the ADLs require certain levels of finger movement or positioning, as well as levels of gripping force. In this sense, the design of the exoskeleton must achieve the adequate transmission of force that allows the necessary grip on the fingers in action [20].

One way to classify hand exoskeletons is according to the improvement of the force increase in the concentric movements of the fingers [88]. There are usually two types of exoskeleton robot systems: hard exoskeleton or rigid exoskeletons (traditional) and soft exoskeleton. In the first type, the grip, movement, and gripping force can be controlled simpler than in the second type, which usually has a pneumatic actuation. For this reason, some studies have measured the force developed by the exoskeletons to compare if it is enough to achieve the patient needs during rehabilitation therapies that the patient needs [89]–[93].

Batzianoulis et al. [86] perform a series of experiments where they describe the common ADL movement patterns in the hand by observing grip accuracy from an EMG input. A similar approach is addressed by [87], which also perform experimental measurements of the grip and the angles (ROM) developed from an EMG-type interaction.

From 2021 to May 10, 2022, some 22 Scopus-indexed papers have been published. Excluding works that involve the development of feedback, motor development from other parts than the hand, medical protocols of non-direct measurement, or robots of other kinds, the following articles show studies directly related to hand rehabilitation with the assistance of an exoskeleton robot. In the works of [88], a protocol was proposed where each patient (n=10) had to perform a gripping effort equivalent to 25 N, 15 N, and 8 N. Their results show less effort for the activation of the movement produced in the arm when the exoskeleton is used. As for the case of [94], they present an exoskeleton that allows them to achieve 40% of the ADL proposed by [15] and allows them to achieve a grip strength of 94.61±1.92 N, which they consider sufficient to attend the ADLs. The work of [95], who proposes an exoskeleton based on soft robotics, performs several rehabilitation protocols in n=16. Their results show that motor functions are improved, particularly gripping.

C. According to the actuation

An actuator can convert energy into movement [71]. The actuators used for this type of exoskeleton must allow control of the applied force [93]. Since, in some cases, the hand may interact with its environment, achieving feedback of the force applied to the object may be desirable, which can be achieved through the control mechanism.

Actuators can be classified into active and passive. Passive actuation generally consists of using parts that can store energy, such as springs or elastic materials, and therefore do not necessarily require energy use. In the case of active performance, external energy is required [61].

A key design criterion is the type and number of actuators for an exoskeleton. In the same way, the levels of action can also be classified as actuated and underactuated [96]. In the first case, the number of actuators and DOF are equal, while in the second case, there are more DOF than actuators [97]. Fewer actuators can result in a lighter design. Therefore, a current trend is the development of exoskeletons, whose system is underactuated [98], allowing a better adaptation to the object's shape, although sacrificing controllability and precision. In addition, the type of actuator influences the movements to be achieved and the appropriate control system. For exoskeletons, the control strategies are usually low-level and high-level. The former are usually based on controlling physical parameters such as force, torque, and position. Instead, high-level strategies tend to influence the relationship between the exoskeleton and its environment, in some cases, also integrating low-level strategies. Among them, it is sought to control parameters such as grip strength and finger position, which depend on the object's shape and the force necessary for a certain object, among other factors [71].

Furthermore, actuators can be hydraulic, spring, electric motors, pneumatic, soft fluidic actuators, shape memory

alloys (SMA), series elastic actuators (SEA), variable stiffness actuators (VSA), parallel elastic actuators (PEA), and magnetorheological series elastic actuators (MRSEA) [61], [99], [100]. An extensive and comprehensive review of these has been previously detailed in the literature by [61], [70].

D. According to the mechanisms and transmission

A suitable transmission mechanism in the exoskeleton is necessary to achieve the required ROM and strength, and these can generally consist of a rigid mechanical structure, cables, or a flexible structure. The mechanical design selected for the exoskeleton will allow it to achieve the desired mobility based on the kinematics, the location of mechanical systems, and the adjustment strategies that allow it to adapt to the morphology of the hand [70].

Regarding the kinematic selection, [70]classifies hand exoskeleton robots into glove-based and linkage-based. In the first type, the user uses a flexible glove equipped with sensors. In the second case, basically, mechanical bonds are used to form the components. Depending on the location of the systems, glove-type devices can be designed with dorsal, lateral, or planar placement. Within this classification, the following types of transmissions found cables: flexible cables or wires, gear/screw, gearboxes, helical gears, belts, harmonic transmission, direct transmission, links, or cams [100].

As for the transmission, its design is limited by the choice of actuators and structure [74]. The simplest and most common way in existing exoskeletons to transmit movement and force is using direct, generally rigid links [63]. These systems belong to a classification of rigid mechanical structures and are generally associated with the use of electric motors.

Another widely used strategy, often paired with the first type of transmission, is cable-based. These can be divided into Bowden-type cables or tendons [61], or open or closed loops [72], which are the transmission systems based on a pulley, cable Bowden, Capstan, pneumatic muscles, push and pull cables, or motorized. They can be one-way or bi-directional.

E. According to the sensing

Sensing allows exoskeleton robots to have feedback on their control systems; by this, the effectiveness and progress of both the user and the therapy can be measured. It is desirable to acquire information from various parameters, such as position, force, torque, or biosignals [63]. Regarding the position, sensing allows detecting the position of the mechanical links concerning a reference base point, generally the base of the exoskeleton. Also, it is interesting to know the trajectory it can follow. The sensing mechanisms include encoders (optical and magnetic), potentiometers, and flexible band sensors.

In exoskeletons, measuring forces is necessary since ADLs require different levels of force that depend on various factors, including the object's shape. In addition, these allow to adapt the training during rehabilitation and establish limits to it. Force measurement is usually done at the fingertips, as they are usually in contact with the gripped object [61]. These values are generally around 10 N [71], [101].

The control systems in an exoskeleton generally consist of a microcontroller that processes the sensed signals and, based on these, orders the movement of the actuators. Furthermore, these signals can also be treated in greater depth to determine the effectiveness of the rehabilitation treatment and thus generate a better process for the patient [61]. The existing control types are broad and can be classified into different hierarchies. For example, regarding the type of signal collected, as observed in the sensing, they can be movement, force, or biosignals. The type of control can be a master-slave, training for a specific task, continuous passive movement, or active resistance. Moreover, as previously mentioned, in terms of its scheme can be low or high level [61], [63], [70].

V. Final Remarks

Hand rehabilitation continues to trend since several conditions may cause different degrees of hand impairments, affecting the capabilities of those who suffer them in executing the ADL. Nowadays, robotic rehabilitation using devices such as exoskeleton robots has gained an important place in rehabilitation therapy due to aspects related to their safe, intensive, and task-oriented use at a relatively low cost, which can be combined with other technologies such as virtual and augmented reality, BCI, haptics, and others.

Hand exoskeleton robots may be conceived based on the purpose, materials, actuation, gripping, and mechanism selected. Most recent start to rely on soft technologies, and while more research is being performed each year, some challenges related to task precisions are still to be overcome. A rigid actuation is still a strong option since it can provide precision task-oriented patient therapies.

Hand rehabilitation faces many challenges, including the diversity of the potential patients' conditions, such as their demographics, diagnosis, clinical time, and remaining functions. All these raise a need for customization, which can be achieved by including these parameters in the early stages of design. Some design techniques such as design thinking [102], waterfall and V models [103], design for additive manufacturing (DfAM) [104], [105], among others that are well adapted to customization and personalization, become attractive proposals for accounting to the stakeholders' perspectives, in this case, mainly on patients and practitioners.

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (https://www.senacyt.gob.pa/) for its financial support to the Master of Science program in Mechanical Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering (https://fim.utp.ac.pa/) of the Universidad Tecnológica de Panama (https://utp.ac.pa/), as well as the International Affairs Office for the partial funding of this project.

References

[1] M. A. Khan, R. Das, H. K. Iversen, and S. Puthusserypady, "Review on motor imagery based BCI systems for upper limb post-stroke neurorehabilitation: From designing to application," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 123, p. 103843, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.compbiomed.2020.103843.

[2] T. Proietti, "Characterizing the reciprocal adaptation in physical human-robot interaction to address the inter-joint coordination in neurorehabilitation," Université Pierre et Marie Curie, France, 2017. [Online]. Available: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01919847/document

[3] M Patrice Lindsay *et al.*, "Global Stroke Fact Sheet 2019," World Stroke Organization (WSO), 2019. [Online]. Available: https://www.world-stroke.org/assets/downloads/WSO_Fact-sheet_15.01.2020.pdf

[4] J. Bernhardt, G. Urimubenshi, D. B. C. Gandhi, and J. J. Eng, "Stroke rehabilitation in low-income and middle-income countries:

a call to action," *The Lancet*, vol. 396, no. 10260, pp. 1452–1462, Oct. 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)31313-1.

[5] I. Kocur, E. Krug, S. P. Mariotti, and M. McCoy, *Benefits of integrating eye care into health systems*. World Health Organization, 2018. Accessed: Sep. 04, 2021. [Online]. Available: https://apps.who.int/iris/handle/10665/276010

[6] United Nations, "Goal 3: Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages," *United Nations Sustainable Development*, 2021. https://www.un.org/sustainabledevelopment/health/ (accessed Aug. 01, 2022).

[7] F. Aggogeri, T. Mikolajczyk, and J. O'Kane, "Robotics for rehabilitation of hand movement in stroke survivors," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 4, p. 1687814019841921, Apr. 2019, doi: 10.1177/1687814019841921.

[8] R. A. R. C. Gopura, D. S. V. Bandara, K. Kiguchi, and G. K. I. Mann, "Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 203–220, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.robot.2015.10.001.

[9] F. Baldan *et al.*, "Robot-assisted rehabilitation of hand function after stroke: Development of prediction models for reference to therapy," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 57, p. 102534, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jelekin.2021.102534.

[10] G. B. Prange, "Rehabilitation robotics : stimulating restoration of arm function after stroke," PhD, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2009. doi: 10.3990/1.9789036529013.

[11] K. Sirlantzis, L. B. Larsen, L. K. Kanumuru, and P. Oprea, "11 - Robotics," in *Handbook of Electronic Assistive Technology*, D. Cowan and L. Najafi, Eds. Academic Press, 2019, pp. 311–345. doi: 10.1016/B978-0-12-812487-1.00011-9.

[12] T. Ableitner, S. Soekadar, C. Strobbe, A. Schilling, and G. Zimmermann, "Interaction techniques for a neural-guided hand exoskeleton," *Procedia Computer Science*, vol. 141, pp. 442–446, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.10.164.

[13] M. Zhuralvev, A. Runnova, and A. Kiselev, "Characteristics of post-stroke patients brain activity with real and imagined movements in the BCI - rehabilitation process," *Procedia Computer Science*, vol. 169, pp. 677–685, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.02.184.

[14] N. A. Bhagat *et al.*, "Neural activity modulations and motor recovery following brain-exoskeleton interface mediated stroke rehabilitation," *NeuroImage: Clinical*, vol. 28, p. 102502, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.nicl.2020.102502.

[15] A. M. Dollar, "Classifying Human Hand Use and the Activities of Daily Living," in *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, R. Balasubramanian and V. J. Santos, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 201–216. doi: 10.1007/978-3-319-03017-3_10.

[16] A. Saudabayev, Z. Rysbek, R. Khassenova, and H. A. Varol, "Human grasping database for activities of daily living with depth, color and kinematic data streams," *Sci Data*, vol. 5, p. 180101, May 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.101.

[17] L. Reissner, G. Fischer, R. List, P. Giovanoli, and M. Calcagni, "Assessment of hand function during activities of daily living using motion tracking cameras: A systematic review," *Proc Inst Mech Eng H*, vol. 233, no. 8, pp. 764–783, Aug. 2019, doi: 10.1177/0954411919851302.

[18] B. Allotta, R. Conti, L. Governi, E. Meli, A. Ridolfi, and Y. Volpe, "Development and experimental testing of a portable hand exoskeleton," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, Sep. 2015, pp. 5339–5344. doi: 10.1109/IROS.2015.7354131.

[19] M. K. Burns, K. Van Orden, V. Patel, and R. Vinjamuri, "Towards a wearable hand exoskeleton with embedded synergies," in *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Jul. 2017, pp. 213–216. doi: 10.1109/EMBC.2017.8036800.

[20] I. Jo and J. Bae, "Design and control of a wearable and force-controllable hand exoskeleton system," *Mechatronics*, vol. 41, pp. 90–101, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.mechatronics.2016.12.001.

[21] S. Kim, J. Lee, W. Park, and J. Bae, "Quantitative evaluation of hand functions using a wearable hand exoskeleton system," in *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, Jul. 2017, pp. 1488–1493. doi: 10.1109/ICORR.2017.8009458.

[22] B. Buchholz and T. J. Armstrong, "A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities," *Journal of Biomechanics*, vol. 25, no. 2, pp. 149–162, Feb. 1992, doi: 10.1016/0021-9290(92)90272-3.

[23] N. J. Jarque-Bou, M. Vergara, J. L. Sancho-Bru, V. Gracia-Ibanez, and A. Roda-Sales, "Hand Kinematics Characterization While Performing Activities of Daily Living Through Kinematics Reduction," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 28, no. 7, pp. 1556–1565, Jul. 2020, doi: 10.1109/TNSRE.2020.2998642.

[24] S. Cobos, M. Ferre, and R. Aracil, "Simplified human hand models based on grasping analysis," in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Oct. 2010, pp. 610–615. doi: 10.1109/IROS.2010.5651479.

[25] M. A. Rahman and A. Al-Jumaily, "Design and Development of a Hand Exoskeleton for Rehabilitation Following Stroke," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1028–1034, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.279.

[26] M. Zarzoura, P. del Moral, M. I. Awad, and F. A. Tolbah, "Investigation into reducing anthropomorphic hand degrees of freedom while maintaining human hand grasping functions," *Proc Inst Mech Eng H*, vol. 233, no. 2, pp. 279–292, Feb. 2019, doi: 10.1177/0954411918819114.

[27] T. Feix, "Anthropomorphic Hand Optimization based on a Latent Space Analysis," Technische Universität Wien, Wien, 2011. [Online]. Available: http://me.xief.net/publications/thesis.pdf

[28] T. Feix, J. Romero, H.-B. Schmiedmayer, A. M. Dollar, and D. Kragic, "The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types," *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 66–77, Feb. 2016, doi: 10.1109/THMS.2015.2470657.

[29] M. Cutkosky and P. Wright, "Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands," in *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, USA, 1986, vol. 3, pp. 1533–1539. doi: 10.1109/ROBOT.1986.1087525.

[30] M. Vergara, J. L. Sancho-Bru, V. Gracia-Ibáñez, and A. Pérez-González, "An introductory study of common grasps used by adults during performance of activities of daily living," *Journal of Hand Therapy*, vol. 27, no. 3, pp. 225–234, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jht.2014.04.002.

[31] Hirt, Bernhard, Harun, Seyhan, Wagner, Michael, and Zumhasch, Rainer, *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics*, Thiemi. India, 2017. Accessed: May 01, 2022. [Online]. Available: https://www.thieme.com/books-main/anatomy/product/3967-hand-and-wrist-anatomy-and-biomechanics

[32] J. Z. Zheng, S. De La Rosa, and A. M. Dollar, "An investigation of grasp type and frequency in daily household and machine shop tasks," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, May 2011, pp. 4169–4175. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980366.

[33] K. Ghonasgi, C. G. Rose, A. C. De Oliveira, R. J. Varghese, and A. D. Deshpande, "Design and Validation of a Novel Exoskeleton Hand Interface: The Eminence Grip," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2021, pp. 3707–3713. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561744.

[34] A. Gopal, W.-Y. Hsu, D. D. Allen, and R. Bove, "Remote Assessments of Hand Function in Neurological Disorders: Systematic Review," *JMIR Rehabil Assist Technol*, vol. 9, no. 1, p. e33157, Mar. 2022, doi: 10.2196/33157.

[35] H. Stig Jørgensen, H. Nakayama, H. O. Raaschou, and T. Skyhøj Olsen, "Stroke: Neurologic and Functional Recovery The Copenhagen Stroke Study," *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, vol. 10, no. 4, pp. 887–906, Nov. 1999, doi: 10.1016/S1047-9651(18)30169-4.

[36] L. L. van der Velden, M. A. C. de Koff, G. M. Ribbers, and R. W. Selles, "The diagnostic levels of evidence of instrumented devices for measuring viscoelastic joint properties and spasticity; a systematic review," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 19, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s12984-022-00996-7.

[37] N. R. Butler, S. A. Goodwin, and J. C. Perry, "Design parameters and torque profile modification of a spring-assisted hand-opening exoskeleton module," in *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, Jul. 2017, pp. 591–596. doi: 10.1109/ICORR.2017.8009312.

[38] J. C. van den Noort *et al.*, "European consensus on the concepts and measurement of the pathophysiological neuromuscular responses to passive muscle stretch," *Eur J Neurol*, vol. 24, no. 7, pp. 981-e38, Jul. 2017, doi: 10.1111/ene.13322.

[39] C. Lehman and Association of Rehabilitation Nurses, *The specialty practice of rehabilitation nursing: a core curriculum*. 2015.

[40] M. Le Danseur, "Stroke Rehabilitation," *Critical Care Nursing Clinics of North America*, vol. 32, no. 1, pp. 97–108, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.cnc.2019.11.004.

[41] Y. S. Ng, J. Stein, M. Ning, and R. M. Black-Schaffer, "Comparison of Clinical Characteristics and Functional Outcomes of Ischemic Stroke in Different Vascular Territories," *Stroke*, vol. 38, no. 8, pp. 2309–2314, Aug. 2007, doi: 10.1161/STROKEAHA.106.475483.

[42] S.-M. Lai, S. Studenski, P. W. Duncan, and S. Perera, "Persisting Consequences of Stroke Measured by the Stroke Impact Scale," *Stroke*, vol. 33, no. 7, pp. 1840–1844, Jul. 2002, doi: 10.1161/01.STR.0000019289.15440.F2.

[43] H. Nakayama, H. Stig Jørgensen, H. Otto Raaschou, and T. Skyhøj Olsen, "Recovery of upper extremity function in stroke patients: The Copenhagen stroke study," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 75, no. 4, pp. 394–398, Apr. 1994, doi: 10.1016/0003-9993(94)90161-9.

[44] T. Takebayashi, K. Takahashi, Y. Okita, H. Kubo, K. Hachisuka, and K. Domen, "Impact of the robotic-assistance level on upper extremity function in stroke patients receiving adjunct robotic rehabilitation: sub-analysis of a randomized clinical trial," *J NeuroEngineering Rehabil*, vol. 19, no. 1, p. 25, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12984-022-00986-9.

[45] K. N. Arya, S. Pandian, R. Verma, and R. K. Garg, "Movement therapy induced neural reorganization and motor recovery in stroke: A review," *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, vol. 15, no. 4, pp. 528–537, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.jbmt.2011.01.023.

[46] A. Feydy *et al.*, "Longitudinal Study of Motor Recovery After Stroke," *Stroke*, vol. 33, no. 6, pp. 1610–1617, Jun. 2002, doi: 10.1161/01.STR.0000017100.68294.52.

[47] R. J. Nudo, B. M. Wise, F. SiFuentes, and G. W. Milliken, "Neural Substrates for the Effects of Rehabilitative Training on Motor Recovery After Ischemic Infarct," *Science*, vol. 272, no. 5269, pp. 1791–1794, Jun. 1996, doi: 10.1126/science.272.5269.1791.

[48] P. Pantano *et al.*, "Motor recovery after stroke: Morphological and functional brain alterations," *Brain*, vol. 119, no. 6, pp. 1849–1857, Dec. 1996, doi: 10.1093/brain/119.6.1849.

[49] R. H. Parry, N. B. Lincoln, and C. D. Vass, "Effect of severity of arm impairment on response to additional physiotherapy early after stroke," *Clin Rehabil*, vol. 13, no. 3, pp. 187–198, Jun. 1999, doi: 10.1177/026921559901300302.

[50] M. P. Lindsay, Gubitz, G., Bayley, M., and Phillips, S., "CHAPTER 5 Stroke Rehabilitation," Canada, 5, 2013. [Online]. Available: http://www.ipts.org.il/_Uploads/dbsAttachedFiles/SBP2013_Stroke-Rehabilitation-Update_July-10_FINAL.pdf

[51] C. J. Winstein *et al.*, "Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association," *Stroke*, vol. 47, no. 6, Jun. 2016, doi: 10.1161/STR.0000000000000098.

[52] C. J. Winstein and D. B. Kay, "Chapter 16 - Translating the science into practice: shaping rehabilitation practice to enhance recovery after brain damage," in *Progress in Brain Research*, vol. 218, N. Dancause, S. Nadeau, and S. Rossignol, Eds. Elsevier, 2015, pp. 331–360. doi: 10.1016/bs.pbr.2015.01.004.

[53] J. Lieber, J. Dittli, O. Lambercy, R. Gassert, A. Meyer-Heim, and H. J. A. van Hedel, "Clinical utility of a pediatric hand exoskeleton: identifying users, practicability, and acceptance, and recommendations for design improvement," *J NeuroEngineering Rehabil*, vol. 19, no. 1, p. 17, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12984-022-00994-9.

[54] G. Morone, I. Cocchi, S. Paolucci, and M. Iosa, "Robot-assisted therapy for arm recovery for stroke patients: state of the art and clinical implication," *Expert Review of Medical Devices*, vol. 17, no. 3, pp. 223–233, Mar. 2020, doi: 10.1080/17434440.2020.1733408.

[55] H. J. A. van Hedel and T. Aurich (-Schuler), "Clinical Application of Rehabilitation Technologies in Children Undergoing Neurorehabilitation," in *Neurorehabilitation Technology*, D. J. Reinkensmeyer and V. Dietz, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 283–308. doi: 10.1007/978-3-319-28603-7_14.

[56] P. D. E. Baniqued *et al.*, "Brain–computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review," *J NeuroEngineering Rehabil*, vol. 18, no. 1, p. 15, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12984-021-00820-8.

[57] E. M. Abd El-Kafy, M. A. Alshehri, A. A.-R. El-Fiky, M. A. Guermazi, and H. M. Mahmoud, "The Effect of Robot-Mediated Virtual Reality Gaming on Upper Limb Spasticity Poststroke: A Randomized-Controlled Trial," *Games for Health Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 93–103, 2022, doi: 10.1089/g4h.2021.0197.

[58] M. S. Cameirão, S. B. i Badia, E. Duarte, A. Frisoli, and P. F. M. J. Verschure, "The Combined Impact of Virtual Reality Neurorehabilitation and Its Interfaces on Upper Extremity Functional Recovery in Patients With Chronic Stroke," *Stroke*, vol. 43, no. 10, pp. 2720–2728, Oct. 2012, doi: 10.1161/STROKEAHA.112.653196.

[59] A. Topini, W. Sansom, N. Secciani, L. Bartalucci, A. Ridolfi, and B. Allotta, "Variable Admittance Control of a Hand Exoskeleton for Virtual Reality-Based Rehabilitation Tasks," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 15, 2022, doi: 10.3389/fnbot.2021.789743.

[60] D. Sen, S. Mohan, and G. K. Ananthasuresh, Eds., *Mechanism and Machine Science: Select Proceedings of Asian MMS 2018*. Singapore: Springer Singapore, 2021. doi: 10.1007/978-981-15-4477-4.

[61] T. du Plessis, K. Djouani, and C. Oosthuizen, "A Review of Active Hand Exoskeletons for Rehabilitation and Assistance," *Robotics*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2021, doi: 10.3390/robotics10010040.

[62] K. R. Mills, "THE BASICS OF ELECTROMYOGRAPHY," *Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 76, p. 4, 2005.

[63] P. W. Ferguson, B. Dimapasoc, Y. Shen, and J. Rosen, "Design of a Hand Exoskeleton for Use with Upper Limb Exoskeletons," in *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, vol. 22, M. C. Carrozza, S. Micera, and J. L. Pons, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 276–280. doi: 10.1007/978-3-030-01887-0_53.

[64] N. Padfield, J. Zabalza, H. Zhao, V. Masero, and J. Ren, "EEG-Based Brain-Computer Interfaces Using Motor-Imagery: Techniques and Challenges," *Sensors*, vol. 19, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19061423.

[65] J. Tidare, M. Leon, and E. Astrand, "Time-resolved estimation of strength of motor imagery representation by multivariate EEG decoding," *J. Neural Eng.*, vol. 18, no. 1, p. 016026, Feb. 2021, doi: 10.1088/1741-2552/abd007.

[66] E. Astrand, J. Plantin, S. Palmcrantz, and J. Tidare, "EEG non-stationarity across multiple sessions during a Motor Imagery-BCI intervention: two post stroke case series," in *2021 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, May 2021, pp. 817–821. doi: 10.1109/NER49283.2021.9441076.

[67] S. R. Soekadar *et al.*, "Hybrid EEG/EOG-based brain/neural hand exoskeleton restores fully independent daily living activities after quadriplegia," *Sci Robot*, vol. 1, no. 1, p. eaag3296, Dec. 2016, doi: 10.1126/scirobotics.aag3296.

[68] M. Nann, N. Peekhaus, C. Angerhöfer, and S. R. Soekadar, "Feasibility and Safety of Bilateral Hybrid EEG/EOG Brain/Neural–Machine Interaction," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 14, p. 521, 2020, doi: 10.3389/fnhum.2020.580105.

[69] Centre for Science and Technology Studies, Leiden University, "VOSviewer - Visualizing scientific landscapes," *VOSviewer - Visualizing scientific landscapes*, 2022. https://www.vosviewer.com/ (accessed May 21, 2022).

[70] M. Sarac, M. Solazzi, and A. Frisoli, "Design Requirements of Generic Hand Exoskeletons and Survey of Hand Exoskeletons for Rehabilitation, Assistive, or Haptic Use," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 12, no. 4, pp. 400–413, Oct. 2019, doi: 10.1109/TOH.2019.2924881.

[71] T. Shahid, D. Gouwanda, S. G. Nurzaman, and A. A. Gopalai, "Moving toward Soft Robotics: A Decade Review of the Design of Hand Exoskeletons," *Biomimetics*, vol. 3, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2018, doi: 10.3390/biomimetics3030017.

[72] J. D. Sanjuan *et al.*, "Cable driven exoskeleton for upper-limb rehabilitation: A design review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 126, p. 103445, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.robot.2020.103445.

[73] S. Briouza, H. Gritli, N. Khraief, S. Belghith, and D. Singh, "A Brief Overview on Machine Learning in Rehabilitation of the

Human Arm via an Exoskeleton Robot," in *2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)*, Oct. 2021, pp. 129–134. doi: 10.1109/ICDABI53623.2021.9655865.

[74] O. Luhmann, "Development of a Novel Hand Exoskeleton for the Rehabilitation and Assistance of Upper Motor Neuron Syndrome Patients," p. 129, 2020.

[75] M. Asadujjaman, M. Molla, and Sk. N. Noman, "Stature Estimation from Hand Anthropometric Measurements in Bangladeshi Population," *Journal of Forensic and Legal Medicine*, vol. 65, May 2019, doi: 10.1016/j.jflm.2019.05.006.

[76] N. K. Bayraktar and E. Tokmak Özşahin, "Anthropometric measurement of the hand," *Eastern J Med*, vol. 23, no. 4, pp. 298–301, 2018, doi: 10.5505/ejm.2018.03164.

[77] V. Gnaneswaran and R. R. Bishu, "Anthropometry and hand performance evaluation of minority population," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, no. 6, pp. 661–670, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.ergon.2011.07.003.

[78] S. Rostamzadeh *et al.*, "Analysis of hand-forearm anthropometric components in assessing handgrip and pinch strengths of school-aged children and adolescents: a partial least squares (PLS) approach," *BMC Pediatr*, vol. 21, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12887-020-02468-0.

[79] Theresa Stack, Lee T. Ostrom, and Cheryl A. Wilhelmsen, *Occupational Ergonomics: A Practical Approach | Wiley*. 2016. Accessed: Oct. 17, 2021. [Online]. Available: https://www.wiley.com/en-ad/Occupational+Ergonomics%3A+A+Practical+Approach-p-9781118814215

[80] C. Wang and D. Cai, "Hand tool handle design based on hand measurements," *MATEC Web Conf.*, vol. 119, p. 01044, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201711901044.

[81] J. Wen *et al.*, "Hand anthropometry and its relation to grip/pinch strength in children aged 5 to 13 years," *J Int Med Res*, vol. 48, no. 12, p. 0300060520970768, Dec. 2020, doi: 10.1177/0300060520970768.

[82] A. R. Moital, S. Dogramadzi, and H. A. Ferreira, "Development of an EMG controlled hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation," in *Proceedings of the 3rd 2015 Workshop on ICTs for improving Patients Rehabilitation Research Techniques*, Lisbon Portugal, Oct. 2015, pp. 66–72. doi: 10.1145/2838944.2838961.

[83] S. W. Lee, K. M. Wilson, B. A. Lock, and D. G. Kamper, "Subject-specific myoelectric pattern classification of functional hand movements for stroke survivors," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 558–566, 2011, doi: 10.1109/TNSRE.2010.2079334.

[84] J. C. Castiblanco, S. Ortmann, I. F. Mondragon, C. Alvarado-Rojas, M. Jöbges, and J. D. Colorado, "Myoelectric pattern recognition of hand motions for stroke rehabilitation," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 57, p. 101737, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101737.

[85] Mayo Clinic, "Electromiografía - Mayo Clinic," 2021. https://www.mayoclinic.org/es-es/tests-procedures/emg/about/pac-20393913 (accessed Sep. 25, 2021).

[86] I. Batzianoulis, S. El-Khoury, E. Pirondini, M. Coscia, S. Micera, and A. Billard, "EMG-based decoding of grasp gestures in reaching-to-grasping motions," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 91, pp. 59–70, May 2017, doi: 10.1016/j.robot.2016.12.014.

[87] L. R. McKenzie, B. C. Fortune, L. T. Chatfield, and C. G. Pretty, "Finger Grasp Kinematics Towards Exoskeleton Development," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 15934–15939, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.371.

[88] E. R. Triolo and B. F. BuSha, "Design and experimental testing of a force-augmenting exoskeleton for the human hand," *J NeuroEngineering Rehabil*, vol. 19, no. 1, p. 23, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12984-022-00997-6.

[89] M. V. Arteaga, J. C. Castiblanco, I. F. Mondragon, J. D. Colorado, and C. Alvarado-Rojas, "EMG-driven hand model based on the classification of individual finger movements," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 58, p. 101834, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101834.

[90] A. D. Do Rosario Carvalho, N. Karanth P, and V. Desai, "Design and characterization of a pneumatic muscle actuator with novel end-fittings for medical assistive applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 331, p. 112877, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112877.

[91] M. Haghshenas-Jaryani, R. M. Patterson, N. Bugnariu, and M. B. J. Wijesundara, "A pilot study on the design and validation of a hybrid exoskeleton robotic device for hand rehabilitation," *Journal of Hand Therapy*, vol. 33, no. 2, pp. 198–208, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jht.2020.03.024.

[92] P. Herbin and M. Pajor, "Human-robot cooperative control system based on serial elastic actuator bowden cable drive in ExoArm 7-DOF upper extremity exoskeleton," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 163, p. 104372, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104372.

[93] I. Jo and J. Bae, "A Force-Controllable Compact Actuator Module for a Wearable Hand Exoskeleton," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 4453–4458, 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01863.

[94] D. Esposito *et al.*, "Design of a 3D-Printed Hand Exoskeleton Based on Force-Myography Control for Assistance and Rehabilitation," *Machines*, vol. 10, no. 1, p. 57, Jan. 2022, doi: 10.3390/machines10010057.

[95] X. Q. Shi, H. L. Heung, Z. Q. Tang, Z. Li, and K. Y. Tong, "Effects of a Soft Robotic Hand for Hand Rehabilitation in Chronic Stroke Survivors," *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, vol. 30, no. 7, 2021, doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2021.105812.

[96] J. Ramirez, A. Rubiano, and P. Castiblanco, "Soft Driving Epicyclical Mechanism for Robotic Finger," *Actuators*, vol. 8, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2019, doi: 10.3390/act8030058.

[97] B. Noronha and D. Accoto, "Exoskeletal Devices for Hand Assistance and Rehabilitation: A Comprehensive Analysis of State-of-the-Art Technologies," *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics*, vol. 3, no. 2, pp. 525–538, May 2021, doi: 10.1109/TMRB.2021.3064412.

[98] J. Vertongen, D. G. Kamper, G. Smit, and H. Vallery, "Mechanical Aspects of Robot Hands, Active Hand Orthoses, and Prostheses: A Comparative Review," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 26, no. 2, pp. 955–965, Apr. 2021, doi: 10.1109/TMECH.2020.3014182.

[99] A. Pagoli, F. Chapelle, J.-A. Corrales-Ramon, Y. Mezouar, and Y. Lapusta, "Review of soft fluidic actuators: classification and materials modeling analysis," *Smart Mater. Struct.*, vol. 31, no. 1, p. 013001, Jan. 2022, doi: 10.1088/1361-665X/ac383a.

[100] M. Tiboni, A. Borboni, F. Vérité, C. Bregoli, and C. Amici, "Sensors and Actuation Technologies in Exoskeletons: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 884, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22030884.

[101] T. Bützer, O. Lambercy, J. Arata, and R. Gassert, "Fully Wearable Actuated Soft Exoskeleton for Grasping Assistance in Everyday Activities," *Soft Robotics*, vol. 8, no. 2, pp. 128–143, Apr. 2021, doi: 10.1089/soro.2019.0135.

[102] C. Nakata and J. Hwang, "Design thinking for innovation: Composition, consequence, and contingency," *Journal of Business Research*, vol. 118, pp. 117–128, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.06.038.

[103] A. Jamnia, *Introduction to product design and development for engineers*, First edition. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018.

[104] M. Leary, "4 - Detail DFAM," in *Design for Additive Manufacturing*, M. Leary, Ed. Elsevier, 2020, pp. 91–122. doi: 10.1016/B978-0-12-816721-2.00004-X.

[105] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah, and A. M. Al-Ahmari, "Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 7936, Sep. 2020, doi: 10.3390/su12197936.

Coastline changes in the Pacific of Panama due to coastal erosion

Cambios en la línea de costa del Pacífico de Panamá debido a erosión costera.

Esther Rodríguez
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
Email: esther.rodriguez@utp.ac.pa

Gabriela Ávila
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
Email: gabriela.avila@utp.ac.pa

Gisselle Guerra-Chanis*
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas,
Universidad Tecnológica de Panamá.
Sistema Nacional de Investigación – SNI
Estación Científica Coiba AIP.
CEMCIT AIP
Ciudad de Panamá, Panamá
gisselle.guerra@utp.ac.pa

Resumen*—Los cambios en zonas costeras son debido al cambio climático, dinamismo costero y actividades antropogénicas. Panamá tiene costas que limitan con el Mar Caribe y el Océano Pacífico y suman alrededor de 2988 kilómetros lineales. Las costas del Pacifico tienen una mayor elevación en comparación con las del Caribe. A partir del 2009 la erosión costera es sobresaliente en la zona de Punta Chame. Mediante el uso de imágenes satelitales, y la herramienta DSAS de ArcGIS se estimó los cambios en la línea de costa de Punta Chame. El propósito de esta investigación es evaluar los cambios costeros y su vinculación con procesos costeros y actividades humanas. Uno de los principales resultados indica que el 50% de la línea costera de Punta Chame fue erosionada entre los años 2005 al 2017. La sección sur de Punta Chame tiene la mayor tasa de erosión pues está más expuesto al oleaje del Pacífico. Se evaluaron estresores naturales y antropogénicos que promueven la erosión costera en la zona.

Palabras claves — Erosión costera, línea costera, vulnerabilidad, DSAS.

Abstract*—Changes in the coastal zone are due to climate change, coastal dynamics, and human activities. Panama's coastline limits the Caribbean Sea and the Pacific Ocean, totaling 2988 km. Larger elevations are observed on the Pacific coast in comparison with the coasts of the Caribbean. Since 2009, coastal erosion is outstanding in Punta Chame. Changes in Punta Chame's coastline were defined using satellite imagery and the ArcGIS DSAS toolbox. This research aims to evaluate coastal changes and their link to coastal processes and human activities. From 2005 to 2017 Punta Chame was 50% eroded. The south section of Punta Chame has the highest erosion rate due to the waves coming from the Pacific Ocean. Natural and anthropogenic stressors were evaluated based on their link to coastal erosion in the zone.

Keywords — coastal erosion, coastline, vulnerability, DSAS.

I. INTRODUCTION

Mundialmente las costas son de gran importancia por los procesos ecológicos, biológicos y geológicos que aquí ocurren. Las costas son afectadas por los procesos de erosión costera, aumento del nivel del mar y extracción de materiales. Entre los impactos más relevantes de la zona costera está la sobreexplotación de sus recursos para aprovechamiento humano y la industrialización del litoral. Los procesos de erosión costera limitan el suministro de arena desde la duna y bancos de arena y alteran el transporte de sedimento. El IPCC indica que para el año 2020, 11% de la población mundial (896 millones de personas) vivían en una zona costera de baja elevación y este número aumentará a más de 1000 millones para el año 2050 debido al desarrollo costero [1, 2].

El litoral Pacífico de Panamá tiene la mayor densidad poblacional [3]. En los últimos 10 años la erosión costera ha aumentado en las costas del Pacífico. Este aumento representa un riesgo y vulnerabilidad para los asentamientos humanos, y sus recursos económicos. El objetivo de esta investigación es definir las tasas de erosión y acreción en Punta Chame en los años recientes. Estas tasas de erosión/acreción permiten identificar los cambios morfodinámicos de la zona.

Al definir los cambios morfodinámicos y las respectivas tasas de erosión en Punta Chame, podemos mejorar los programas de gestión y monitoreo de la zona costera al enfocarlos en la protección de sus recursos.

II. ANTECEDENTES

Los eventos climáticos del 2019 pusieron en alerta a la comunidad de Punta Chame al quedar incomunicadas por acceso terrestre. Punta Chame pertenece al Distrito de Chame, Provincia de Panamá Oeste y tiene una superficie de 17 km^2. Según el Censo Nacional del 2010, tiene una población aproximada de 450 habitantes y una densidad de población de 26.1 hab/km^2 [4]. Debido a estos eventos climáticos, la sociedad civil intenta mitigar los efectos de la erosión costera mediante la construcción de muros enrocados y de PVC.

Desde San Carlos hasta Punta Chame la energía del oleaje es alta. Las olas del Océano Pacífico panameño tienen un período de 18 segundos, longitud de onda de 505 metros, celeridad de 28 m/s [5]. La pérdida de estructuras representa menos ingresos económicos en las principales actividades económicas, como la pesca, el turismo, viveros de plantas y hotelería.

De acuerdo con el informe del IPCC del 2020, la erosión costera es más intensa y afecta más regiones del mundo. El

Investigación financiada por: COSUDE, CSUCA y CEPREDENAC.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00075

aumento del nivel del mar y el uso desordenado de tierras intensifica este fenómeno [6, 7]. El estudio de la erosión costera se puede dar por diversas fuentes y métodos de análisis, las tasas de erosión costera se pueden calcular por kilómetros lineales del retroceso de la línea costera [8], el cálculo de superficies mediante polígonos entre dos líneas de costa levantadas en diferentes fechas [9] y el cálculo de volúmenes que permite un estudio con un enfoque en tres dimensiones [10]. Estas tasas de retroceso de costas se pueden obtener con la comparación de imágenes satelitales de buena resolución a diferentes años. Al identificar que zonas están más propensas a la erosión costera mediante imágenes satelitales, se puede entonces definir su origen y proponer medidas de mitigación.

III. METODOLOGÍA

El retroceso de la línea se analizó a partir de imágenes satelitales obtenidas de ESRI (Environmental Systems Research Institute) y Google Earth. La línea costera se digitalizó y se determinó su cambio mediante la herramienta DSAS (Digital Shoreline Analysis System) disponible en ArcGIS [11]. El DSAS realiza el cálculo de las tasas de cambio de la posición de la costa históricamente [12]. El análisis se realizó en un sistema de referencia WGS84 y con escala de 1:500.

Tabla 1. Rango de los valores de EPR (mm/año) y su erosión/acreción correspondiente.

Clase Rango EPR (m/año)	*Clasificación de los procesos de cambios de la línea costera*
< -15	Erosión muy alta
< -5 a -15	Erosión alta
<-2 a -5	Erosión moderada
-2 a < 2	Estable
>2 a 5	Acreción moderada
>5 a <15	Acreción alta

Fuente: Elaboración propia adaptado de (Cifuentes, Rosero, & Selvaraj, 2017).

Las imágenes satelitales son primero georreferenciadas para obtener las distancias lineales entre líneas de costas de distintos años. Luego se crea un archivo tipo ShapeFile con el programa ArcGIS y se identifican cuatro puntos de referencia en la imagen. La herramienta DSAS de ArcGIS se utiliza para identificar la línea de costa en cada imagen satelital y la línea de costa base se obtiene de la imagen satelital más antigua [12]. La herramienta DSAS dibuja transectos entre las líneas de costa digitalizadas. Más detalles de la metodología disponible en el documento "Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa caribe colombiana" por parte de Nelson Rangel-Buitrago [13].

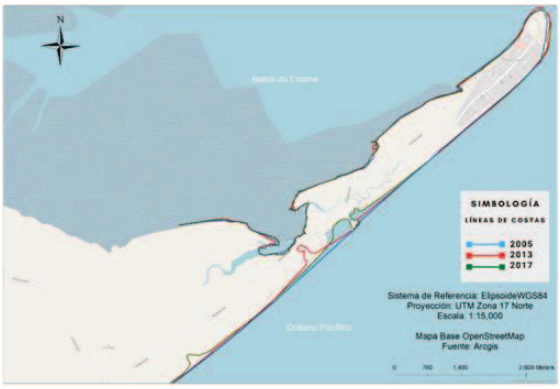


Fig. 1. Líneas de costas trazadas para los años 2005, 2013, 2017.

Los años seleccionados para estimar la erosión costera fueron 2005, 2013 y 2017 (Fig. 1). Las imágenes satelitales de estos años cumplían con los requisitos mínimos para la georreferenciación de su línea de costa. La línea de costa base es la del 2005 por ser la más antigua. En este trabajo se utiliza como referencia para la línea de costa la guía de la línea mojada/seca [14]. La línea de costa en Punta Chame se dividió en dos líneas, la línea norte (al norte de Punta Chame) y la línea sur (limitando con el océano Pacífico). Los transectos son líneas perpendiculares a la línea de costa separados por 10 metros de distancia para minimizar el error.

La erosión costera se evaluó según las variables: *Shoreline Change Envelope (SCE)*, que representa la longitud total que existe entre la línea más antigua y la reciente, y *Net Shoreline Movement (NSM)* que es la distancia de cambio y su signo representa acreción (+) o erosión (-). Ambas variables son magnitudes representativas del cambio. La tasa de cambio es el *End Point Radio (EPR)*, el cual es la división de la distancia real entre las diferencias entre las líneas de costa de los distintos años. Las tasas de cambio se evalúan según los procesos de erosión y acreción y están detallados en la Tabla 1[15].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. *Línea sur*

La línea sur limita con el Océano Pacífico y tiene una longitud de 14.12 km (Fig. 2a). Para su análisis se realizaron 2,820 transectos perpendiculares entre la línea base del 2005 y las líneas costeras del 2013 y 2017. Esta línea está expuesta a un oleaje de alta energía sin atenuación natural o artificial. La distancia máxima negativa es de -344.15 m señalada en color rojo en la Fig. 2a coincide con la zona donde la carretera sufrió daños, ubicada cerca de la antigua camaronera en el año 2019. La distancia máxima positiva es de 100.43 m se localiza en color azul en la punta (Fig. 2a), donde se da el cambio de dirección hacia la línea norte. La tasa promedio de erosión es -6.6 m/año por la clasificación de los procesos de cambios de la línea costera para EPR esto representa una erosión alta (Fig. 3). El 57.66% de la línea sur presenta erosión. Por otro lado, la tasa promedio de acreción es de 1.95 m/año lo que no representa una acreción sino un valor estable de la playa en ese periodo de tiempo.

B. *Línea norte*

La línea norte limita con la Bahía de Chame y tiene una longitud de 12.68 km, en su análisis se realizaron 1260

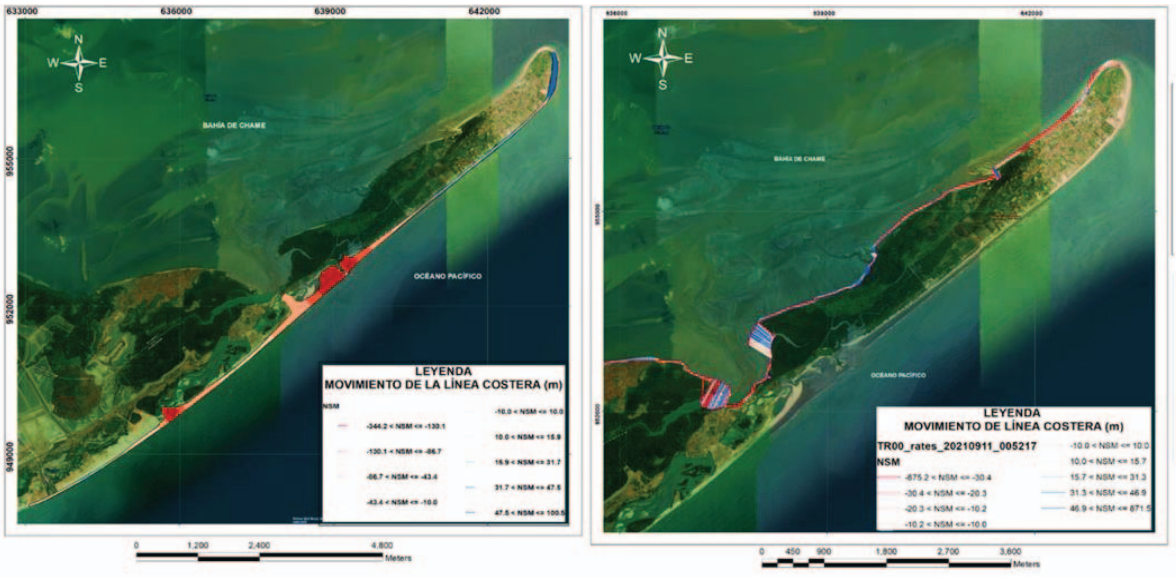


Fig. 2. Zonas de acreción (azul) y erosión (rojo) en las (a) líneas sur y (b) norte de Punta Chame, Panamá Oeste.

transectos perpendiculares entre la línea costera del 2005 (base) y las líneas del 2013 y 2017 (Fig. 2b). El promedio de las distancias negativas es de -38.25 m, con un porcentaje de 60.65% de toda la línea representando en color rojo. Estos transectos negativos están concentrados en los lugares poblados, zonas hoteleras y de actividades pesqueras. En promedio, la distancia positiva es de 65 m en donde se ubican el 40% de los transectos. Estos transectos están ubicados en lugares de baja densidad poblacional y una alta vegetación.

La tasa de cambio (EPR) de erosión es de -3.18 m/año esto se interpreta como una erosión moderada. El 32 % de la costa está erosionada. Para los valores de acreción solo un 17.56% de los transectos presentan una acumulación significativa. La tasa de cambio para acreción es de 5.4 m/año. Este es un valor alto particular de las zonas con cobertura vegetal y con baja densidad poblacional.

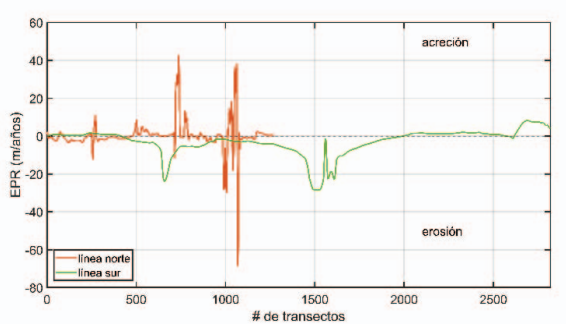


Fig. 3. Resultados de la tasa de erosión EPR para la línea sur.

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis de cambio de línea costera para la línea sur y norte de Punta Chame. Estos valores indican que más del 50% de Punta Chame está erosionado. Los valores son comparados con otros sistemas costeros en el pacífico en donde también se utilizó la herramienta DSAS. La playa El Espino ubicada en El Salvador tiene una tasa de erosión de 2.4 m/año [16] mientras que, las playas de Sinaloa, México tienen una tasa promedio de 2.8 m/año [14].

Tabla 2. Resultados de DSAS para las líneas sur y norte.

Datos de NMS (M)	*Línea Sur*	*Línea Norte*
Distancia media	-35.83 m	2.35m
Porcentaje de todos los transectos que tienen una distancia negativa	57.66%	60.65%
Distancia máxima negativa	-344.15 m	-875.17
promedio de todas las distancias negativas	-79.3 m	-38.35 m
Porcentaje de todos los transectos que tienen una distancia positiva	42.34%	39.35%
Distancia máxima positiva	100.43 m	871.48 m
Promedio de todas las distancias positivas	23.36 m	64.91 m
Datos de EPR (m/año)		
Tasa media	-2.98 m/año	0.2 m/año
Porcentaje de todos los transectos que son erosivos	57.66%	60.65%
Porcentaje de todos los transectos que tienen erosión estadísticamente significativa	56.99%	31.38%
Erosión máxima del valor	-28.65 m/año	72.86 m/año
Promedio de todas las tasas de erosión	-6.6 m/año	-3.18 m/año
Porcentaje de todos los transectos que son acumulativos	42.34%	39.35%
Porcentaje de todos los transectos que tienen acreción estadísticamente significativa	41.63%	17.56%
Acrecentamiento de valor máximo	8.36 m/año	72.56 m/año
Promedio de todas las tasas de acumulación	1.95 m/año	5.4 m/año

La línea sur y la línea norte de Punta Chame tienen tasas de erosión altas, particularmente la línea sur. Existían sitios en donde los transectos entre líneas costeras medían -300 metros. En zonas costeras con desarrollo económico, como el sitio en El Salvador, esta erosión presenta pérdidas millonarias por año. En Panamá, aún no se ha cuantificado los cambios en la línea costera de Punta Chame. La cuantificación económica, social y ambiental es nula en esta zona. Además, presenta aumento en el riesgo y vulnerabilidad de la población.

Procesos naturales como la energía del oleaje y el aumento del nivel del mar generan cambios en la línea costera, a esto se suman las actividades de extracción de arena submarina y deforestación de manglares que inciden negativamente en la erosión costera. Las actividades de extracción de arena en zonas próximas a Punta Chame se han desarrollado por 50 años. Estos resultados demuestran que las zonas con protección vegetal (manglares) y menos pobladas tienen un menor retroceso en su línea costera.

Las tasas de cambio de erosión y acreción pueden ser utilizados para ajustar los índices de vulnerabilidad en zonas costeras [17, 18]. A pesar de que la captura de la línea de costa se hizo a mano alzada y puede resultar imprecisa, este es el primer paso para evidenciar los cambios morfodinámicos de la línea costera y la necesidad de estudios más detallados para monitorear la erosión costera. Los resultados son base científica para mejorar los planes de manejo en zonas costeras, limitaciones en la extracción de arena submarina y además de apoyar políticas nacionales.

IV. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- La tasa de erosión costera es alta en Punta Chame, en comparación con otros sitios costeros del Pacífico. La mayor erosión está en la línea sur que limita con el Océano Pacífico y tiene mayor incidencia de las olas.
- Zonas protegidas, como la línea norte, que limitan con la Bahía de Chame tienen una baja tasa de erosión en donde existe baja densidad poblacional y mayor cobertura de manglares.
- Es necesario estudios más detallados para definir la línea costera de manera más precisa y en base a imágenes satelitales históricas. Además de cuantificar estos cambios en métricas económicas, sociales, turísticas, y ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con el apoyo de la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo (COSUDE), el Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA) y el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana (CEPREDENAC) a través del proyecto: “Resiliencia al Cambio Climático y los Desastres desde la Universidad: Caso de Panamá y Costa Rica”. También agradecemos el apoyo al Sistema Nacional de Investigador – (SNI) de SENACYT por el apoyo en las tareas de investigación y divulgación.

REFERENCIAS

[1] L. C. van Rijn, "Coastal erosion and control," *Ocean & Coastal Management,* vol. 54, no. 12, pp. 867-887, 2011, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004.

[2] R. K. Pachauri *et al.*, *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc, 2014.

[3] (2019). *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Panamá*.

[4] INEC, *Panamá en Cifras 2012 - 2016*. 2017.

[5] M. Grimaldo, "Plano de las Olas del Golfo de Panamá," *Tecnociencia,* vol. 16, no. 2, 2014.

[6] L. Sandoval-Murillo and G. Barrantes, "Changes in land cover in coastal erosion hotspots in the southern Caribbean of Costa Rica during the period 2005-2017," vol. 35, 07/31 2021, doi: 10.15359/ru.35-2.6.

[7] G. Barrantes-Castillo, I. Arozarena-Llopis, L. F. Sandoval-Murillo, and J. F. Valverde-Calderón, "Playas críticas por erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005-2016," *Revista Geográfica de América Central,* no. 64, pp. 75-102, 2020.

[8] J. O. A. Prieto, S. Rodríguez, F. Gracia and L. Del Río, ""Procesos erosivos (tasas de erosión) en los deltas mediterráneos andaluces: herramientas de análisis espacial (DSAS) y evolución temporal (servicios OGC),"" *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica , Madrid, AGE-CSIC, ,* pp. 19-21, 2012.

[9] J. Ojeda Zújar. *Métodos para el Cálculo de la Erosión Costera. Revisión, Tendencias y Propuesta*. (2000).

[10] J. Ojeda Zújar, M. d. P. Díaz Cuevas, A. Prieto Campos, and J. I. Álvarez Francoso, "Línea de costa y sistemas de información geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa andaluza," *Investigaciones Geográficas,* no. 60, 2013, doi: 10.14198/ingeo2013.60.02.

[11] E. A. Himmelstoss, R. E. Henderson, M. G. Kratzmann, and A. S. Farris, "Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide," US Geological Survey, 2331-1258, 2018.

[12] C. A. G. Santos, T. Nascimento, M. Mishra, and R. M. D. Silva, "Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of Joao Pessoa city in Brazil," *Sci Total Environ,* vol. 769, p. 144889, May 15 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144889.

[13] N. Rangel-Buitrago, "Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribeña Colombiana," *Revista Gestión y Ambiente,* vol. 12, no. 2, pp. 43-56, 2009.

[14] Y. G. Zambrano Medina, "Análisis de la línea de costa y evaluación de riesgos costeros en zona sujeta a alta presión antropogénica en el interior del Golfo de California mediante Sistemas de Información Geográfica: DSAS Y CERA," Maestría en Ciencias de la Información, Facultad Informática y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, 2020.

[15] A. Prieto, J. Ojeda, S. Rodríguez, F. J. Gracia, and L. D. Río, "Procesos erosivos (tasas de erosión) en los deltas mediterráneos andaluces: herramientas de análisis espacial (DSAS) y evolución temporal (servicios OGC)," in *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, 19-21 de Septiembre de 2012*, 2012.

[16] (2012). *Estudio de los procesos de erosión–sedimentación playa El Espino, República de El Salvador*.

[17] IPCC, *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: Volume 1: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[18] MiAmbiente, *Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Panamá*. Panama, 2021.

Using Principal Component Analysis to evaluate meteorological data of Panama Bay mangroves

Nathalia Tejedor Flores
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigación
Panama, Panama
nathalia.tejedor@utp.ac.pa

Ruth González
Depto. de Estadística, Universidad de Panamá
Panama, Panama
ruth.gonzalezr@up.ac.pa

Mitzi Cubilla-Montilla
Depto. de Estadística, Universidad de Panamá
Sistema Nacional de Investigación
Panama, Panama
mitzi.cubilla@up.ac.pa

Abstract— **Trees play an essential role in the capture and retention of carbon dioxide (CO_2), the trees that are close to the coasts are called mangroves; this kind of trees provides multiple benefits for the development of many species, as well as the humans that live near these coastal areas. Mangrove ecosystems have the characteristic of capturing much more CO_2 than the species that are in contact with fresh water (much further from the coast) due to the characteristics of the soil; still, they do not have the same number of studies due to the lack of accessibility to perform them. Due to this importance, this research's main objective is to characterize the meteorological data in the area and the relations between them. Multivariate statistical techniques, such as Principal Component Analysis (PCA), have been applied to the data. This research is carried out with data from the Juan Díaz mangrove tower in the Bay of Panama. The dominant factors obtained from the analysis are expected to help develop future studies' CO2 fluxes forecast model.**

Keywords—mangrove ecosystem, sustainability, multivariate analysis, Principal Component Analysis, meteorological data.

I. INTRODUCTION

Mangrove trees and shrubs (the term also includes ferns and palms) are a common sight on mudflats and banks of tropical and subtropical rivers and coastlines in many parts of the world. They stand with their roots in salt water, and they are regularly subject to the influence of tides. As such, they are a unique form of vegetation existing at the boundary of two environments. They are predominantly found in the tropics [1]. [2] estimated that the total mangrove forest area of the world in 2000 was 137,760 km2 in 118 countries and territories. The total mangrove area accounts for 0.7% of the total tropical forests of the world. This areal estimate does not provide information about the quality of the forests. The most considerable extent of mangroves is found in Asia (42%), followed by Africa (20%), North and Central America (15%), Oceania (12%), and South America (11%). Approximately 75% of mangroves are concentrated in just 15 countries (Indonesia, Australia, Brazil, Mexico, Nigeria, Malaysia, Myanmar-Burma, Papua New Guinea, Bangladesh, Cuba, India, Guinea Bissau, Mozambique, Madagascar, and Philippines). In Latin America, mangroves occur in all maritime countries except the three Southernmost nations of the continent. Although only scarce information on the total mangrove area in Latin America, these forests may cover the entire continent from 40,000 to 60,000 km^2 [3]. Since 1980, mangrove populations have declined by approximately 20% worldwide due to development and the indirect impacts of pollution and sediment runoff. Mangrove forests in Panama are no exception, as recent land development in Panama City expands hundreds of hectares of mangroves at risk of destruction [4]. Panama has large stretches of coastline, many of which have the right conditions for mangroves to grow, and a study by [5] shows that Panamanian mangroves are the most diverse on the American continent. Mangroves in Panama are estimated to cover 2.3% of the country's total area and 5.2% of the total forest area [6]. However, over the last 50 years, more than half of the existing mangroves have been deforested [1].

Although they represent a relatively small component of the global biosphere, mangrove forests considerably influence the global carbon and water balance, mainly because they have a nearly continuous growing season, with an estimated net primary productivity of ~218 ± 72 TgCyr-1 [7]. Furthermore, they are key sites of belowground carbon storage [8-9]. Mangrove forests store ~6 times more carbon (26 TgC-1) than is buried in sediments (~4 TgC-1) of other subtropical and tropical coastal margins. Despite considerable uncertainty in extrapolating regionally and globally, mangrove waters release to the atmosphere more than 2.5 times the amount of CO_2 (-16 TgC-1) released from all other subtropical and tropical coastal waters [10]. The high productivity and carbon density of mangroves also underpins why these ecosystems are so important to study, and that they could potentially sequester a large volume of atmospheric CO_2 and thus contribute to climate change mitigation. They make up only 3% of Earth's forest cover, but if they were all cut down, they could contribute up to 10% of global carbon emissions. Adapted to withstand salty water, strong tides, low-oxygen soils and warm tropical temperatures, mangroves protect the coastlines from erosion and storm surges and provide a "nursery" for marine creatures [11]. [12] estimate that 62% of global losses between 2000 and 2016 resulted from land-use change, primarily through conversion to aquaculture and agriculture. There are numerous studies developed throughout the mangroves found in the world, much of this information can be found in the literature review presented by [13] showing the importance of CO_2 sequestration in mangroves over the last 10 years. Mangroves are uniquely efficient carbon sinks: locations where carbon is stored out of the atmosphere. Since 2016, researchers from Panama, the United States and Spain, in the framework of the project supported by the Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) FID16-30 and FIED21-18, have been studying gas fluxes between the biosphere and the atmosphere in the mangrove forest of the Bay of Panama, using the Eddy covariance system installed in the meteorological tower, of which the research team has published several papers. This research, complemented by previous studies in the area, seeks to use meteorological data to obtain adequate representations of Panamanian mangroves, with the aim of helping to meet the commitments made by the country in its Determined

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00076

Contribution to the United Nations Framework Convention on Climate Change [14], and to implement public policies and binding obligations that allow for better management and conservation of mangrove ecosystems. The text is divided into five main sections; Section 1 contains a brief introduction to the topic, Section 2 presents the methodology used, Section 3 contains the main results, and Sections 4 present the discussions and conclusions of this research.

II. Materials and Methods

A. Site

The research site is located in the mangrove of the Bay of Panama, specifically in the area of Juan Díaz, where there is a tower for measuring meteorological variables, and where at least seven species of mangrove are found, two of which are classified as vulnerable on the International Union for Conservation of Nature's Red List of Threatened Species, *Avicennia bicolor* and the *Pelliciera rhizophorae* [15]. The meteorological tower is 30 meters high and contains specialized equipment that measures wind speed and direction, relative humidity, air temperature, ground temperature, ground heat flux, precipitation, net radiation, carbon dioxide, and water vapour. Fig. 1 and Fig. 2.

Fig. 1. View of the Measuring Tower, located in the Juan Díaz Mangrove. Source: CIHH.

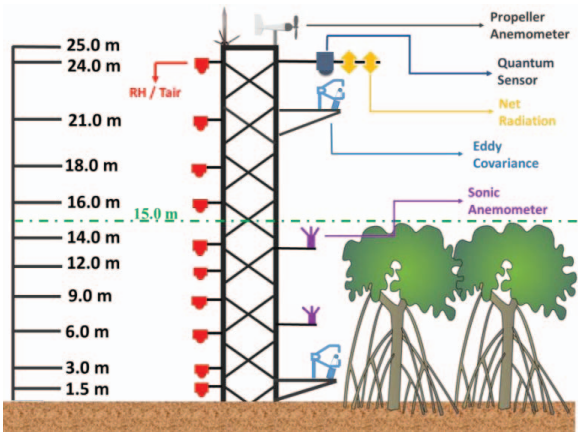


Fig. 2. Scheme of the Meteorological Tower. Source: CIHH.

A total of 22 meteorological variables were collected and used (See Table 1 and Table 2). These data were collected from February 2017 to November 2017 from the Juan Díaz mangrove tower in the Bay of Panama. It's important to know that Mangroves have many unique features that must be considered in investigation project design. They often have extremely high stem densities with abundant prop roots and/or pneumatophores. Mangroves are frequently divided by tidal channels that are difficult to cross, especially at high tides. These and a number of other hazards limit mobility and create safety concerns [16]. Because of the above, access to continuous data and sensors maintenance has been difficult for researchers to obtain, and the total lockdown due to the COVID-19 pandemic in Panama did not allow us to present more recent data from the study area.

TABLE I. Meteorological Variables

Meteorological variables		
Code	***Units***	***Variable***
WS_S_WVT	m/s	wind speed _ Max. height
WindDir	Deg	wind direction
WS_6m	m/s	wind speed _ height 6m_ms x
WS_6m (2)	m/s	wind speed _ height 6m_ms y
WS_14m	m/s	wind speed _ height 14m_ms x
WS_14m (2)	m/s	wind speed _ height 14m_ms y
temp1	°C	temperature 1 _ height 1.5m
temp2	°C	temperature 2 _ height 3m
temp3	°C	temperature 3_ height 6m
temp4	°C	Temperature 4_ height _9m
temp5	°C	temperature 5_ height _12m
temp6	°C	temperature 6_ height _14m
temp7	°C	temperature 7_ height _16m
temp8	°C	temperature 8_ height _18m
temp9	°C	temperature 9_ height _21M
RH1	%	relative humidity 1 _ height _1.5m
RH10	%	relative humidity 10 _ height _24m
BP	hPa	barometric pressure

TABLE II. Meteorological Variables Related with Energy Fluxes

Meteorological variables		
Code	***Units***	***Variable***
CM3Up	W/m^2	incident shortwave radiation
CM3Dn	W/m^2	reflected shortwave radiation
CG3Up	W/m^2	longwave radiation incident
CG3Dn	W/m^2	outgoing longwave radiation
CNR4TK	K	radiometer temperature
CG3UpCo	W/m^2	net radiation up
CG3DnCo	W/m^2	net radiation down
SoilT_A (1)	°C	soil temperature A _ depth 0.5m
SoilT_A (2)	°C	soil temperature A_ depth 0.10m
SoilT_A (3)	°C	soil temperature A_ depth 0.15m

Meteorological variables		
Code	***Units***	***Variable***
SoilT_A (4)	°C	soil temperature A_ depth 0.25M
SoilT_B (1)	°C	soil temperature B_ depth.5m
SoilT_B_ (2)	°C	soil temperature B_ depth 0.10m
SoilT_B (3)	°C	soil temperature B_ depth 0.15m
SoilT_B (4)	°C	soil temperature B_ depth 0.25m
shf_(1)	W/m2	soil heat flux A
shf_(2)	W/m2	soil heat flux B

For this research, we analyzed the meteorological data in two main datasets, one related to different temperatures and wind speeds at different heights (Table 1) and the other related to energy fluxes (Table 2). These data were subjected to a cleaning and quality process to obtain a complete time series for comparisons between variables.

B. Statistical analysis

This section will calculate and present the descriptive statistical analysis of each meteorological variable. Then, Principal Component Analysis (PCA) were implemented on these data to reduce the dimension of the data set and identify the principal components. Given a data matrix X with n rows representing the observations and m columns representing the variables, the variance-covariance matrix Σ is m $\times$ m with the variances in the leading diagonal and the covariances in the off-diagonal elements. The trace of Σ is the total variance in the data. Suppose the columns in X are standardized with zero mean and unit variance. In that case, the values in Σ will be those in the correlation matrix for X with its trace equivalent to the number of columns in X. A standard result in linear algebra states that:

$$LVL^T = R \tag{1}$$

Where V is a diagonal matrix of eigenvalues, L is a matrix of eigenvectors, and the matrix R is symmetric and positive definite. If R is a correlation or variance-covariance matrix denoted by Σ, then the eigenvalues in V will represent the variances of the corresponding principal components.

The eigenvectors in L are column vectors and represent the loadings of each variable on the corresponding principal component. It is usual to report the results for the components in decreasing order of eigenvalue; the component with the largest eigenvalue is that which has the largest variance. For example, on dividing by tr(V), the eigenvalues can be reported as the proportion of variance accounted for by the corresponding components.

Component scores are found by post-multiplying the original data values X by L; the correlation matrix for XL is an identity matrix. Component scores are thus a linear combination of the original data values, and given the values of the scores and the loadings, the original data values can be recovered by an inverse transformation [17].

III. RESULTS

A. Meteorological variables

From a descriptive point of view, we note that the behaviour of temperature at different altitudes has little variability, unlike barometric pressure (BH) where its pressure percentage drops at the maximum altitude and rises at the minimum altitude, it can also be observed that there is a great variability among the meteorological variables present in a mangrove ecosystem. (Table 3).

TABLE III. SUMMARY STATISTICS

Meteorological variables				
Variable	***Mean***	***Minimum***	***Maximum***	***Std. Deviation***
WS_S_WVT	1.76	0.20	6.12	0.92
WindDir	4.61	1.64	6.10	1.17
WS_6m	0.49	0.13	94.70	1.67
WS_6m (2)	193.52	0.01	360.00	133.11
WS_14m	1.00	0.09	3.66	0.57
WS_14m (2)	218.69	0.00	360.00	121.75
temp1	27.24	21.69	35.30	2.53
temp2	27.15	21.59	35.25	2.54
temp3	27.40	21.75	35.31	2.52
temp4	27.20	21.46	34.84	2.46
temp5	27.66	22.20	34.67	2.35
temp6	27.81	22.38	34.59	2.60
temp7	27.64	22.57	34.61	2.29
temp8	27.98	23.33	34.58	2.10
temp9	27.79	22.97	34.59	2.16
RH1	85.24	80.53	89.93	2.02
RH10	77.04	75.47	78.76	2.44
BP	523.54	416.30	952.00	30.52

1) Correlation Matrix.

PCA makes sense when there is a correlation between variables, as it allows for the elimination of redundant information. In the correlation matrix, it is observed that most of the variables are correlated with each other (Fig. 3), which is appropriate for further analysis. Furthermore, the value of the determinant is 0.00, which proves that the correlation matrix is different from an identity matrix.

2) Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) and Bartlett's Test.

Table 4 presents the statistics corresponding to the study of sample fit to the model. We can see that the sample adequacy for this analysis is favorable as the KMO statistic gives us 0.886, higher than 0.5, which indicates that the matrix is appropriate for the study. Furthermore, Bartlett's Test of Sphericity shows that the critical level is 0.000, so the fit of the variables is also appropriate.

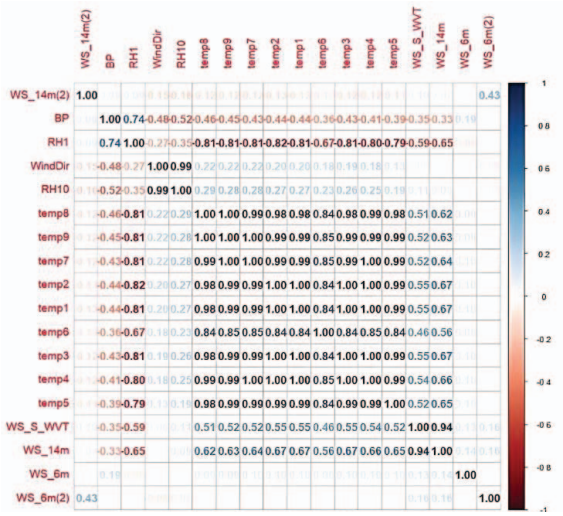


Fig. 3. Correlation Matrix of meteorological variables. Source: Own elaboration using R statistic software.

TABLE IV. KMO AND BARTLETT'S TEST

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy		0.886
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	785634.976
	Df	1
	Sig	0.000

3) PCA.

Analyzing the total variance explained (Table 5), we find that the first component explains 58.97 % of the variance, the second component 12.41 %, and the third component 8.46 %, obtaining with these first three components 80.00 % of the accumulated variance.

TABLE V. EIGENVALUES AND PERCENTAGE OF EXPLAINED VARIANCE BY EACH COMPONENT

Component	*Eigenvalue*	*Variance Explained*	*Cumulative proportion of variance*
PC1	10.614	58.969	58.969
PC2	2.234	12.409	71.378
PC3	1.522	8.456	79.833
PC4	1.047	5.818	85.651
PC5	0.995	5.529	91.180
PC6	0.578	3.214	94.394
PC7	0.557	3.096	97.490
PC8	0.256	1.424	98.915
PC9	0.091	0.508	99.422
PC10	0.053	0.296	99.719
PC11	0.025	0.139	99.858
PC12	0.013	0.071	99.929
PC13	0.008	0.044	99.974
PC14	0.003	0.015	99.988
PC15	0.001	0.008	99.996
PC16	0.000	0.002	99.998
PC17	0.000	0.001	99.999
PC18	0.000	0.001	100.00

The same criterion of obtaining three principal components would be explained in the Sedimentation Graph, according to which, from the addition of the fourth principal component, the distribution flattens out (Fig. 4).

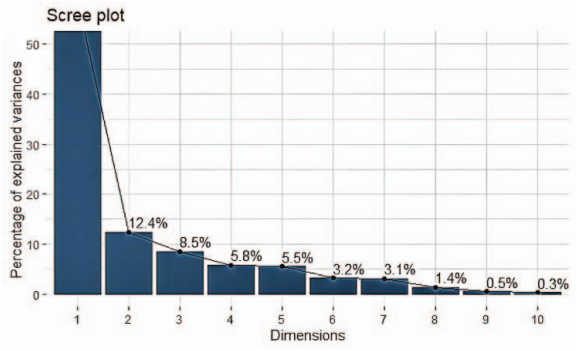


Fig. 4. Scree plot. Source: Own elaboration using R statistic software.

The loading matrix (Table 6) indicates the contribution of each variable in each component. For example, the first component can be labeled as "Temperatures" with high values at the different temperature capture levels. The second component can be labeled as "Barometric Pressure", where only this variable is represented with a high value. And finally, the third component correlates with the variables of wind direction, wind speed, and relative humidity so that we can label it "Wind and Humidity".

TABLE VI. LOADING MATRIX OF PCA.

Variable	*PC1*	*PC2*	*PC3*
WS_S_WVT	**0.626**	0.230	0.449
WindDir	0.269	**-0.877**	0.242
WS_6m	0.100	0.221	-0.026
WS_6m (2)	0.045	0.333	**0.648**
WS_14m	**0.723**	0.281	0.354
WS_14m (2)	-0.117	0.356	**0.664**
temp1	**0.986**	0.062	-0.093
temp2	**0.987**	0.059	-0.092
temp3	**0.985**	0.070	-0.099
temp4	**0.982**	0.081	-0.111
temp5	**0.971**	0.126	-0.134
temp6	**0.858**	0.058	-0.104
temp7	**0.984**	0.045	-0.108
temp8	**0.979**	0.027	-0.109
temp9	**0.982**	0.036	-0.107
RH1	**-0.868**	0.112	-0.152

Variable	*PC1*	*PC2*	*PC3*
RH10	0.339	**-0.860**	0.238
BP	-0.530	0.502	-0.306

4) PCA graph.

In Fig. 5 the temperature variables are represented by the first component. These components do not sufficiently well represent the variables that are close to the center of the graph, in this case, these two dimensions well represent all variables except for the relative humidity variables HB1, HB10, and wind direction (Windir). Note that all the temperature variables of the study site, measured at different altitudes, are very well represented in the first component and correlated with each other. On the other hand, the wind direction parameters are explained by the second component.

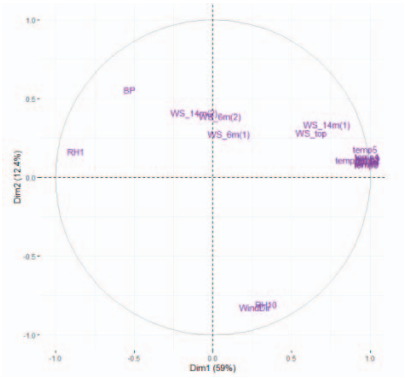


Fig. 5. PCA graph. Source: Own elaboration using R statistic software.

B. Meteorological variables related to energy fluxes

From a descriptive point of view, we note that there is a large variability among the meteorological variables related to energy fluxes present in a mangrove ecosystem (Table 7).

TABLE VII. SUMMARY STATISTICS

Meteorological variables				
Variable	***Mean***	***Minimum***	***Maximum***	***Std. Deviation***
CM3Up	175.59	-5.45	1103.49	262.58
CM3Dn	20.20	-0.92	114.88	27.22
CG3Up	421.68	378.15	503.08	19.71
CG3Dn	463.29	438.85	514.42	17.19
CNR4TK	300.00	295.10	311.50	3.23
CG3UpCo	428.30	360.90	524.47	20.98
CG3DnCo	459.75	430.18	531.74	17.98
SoilT_A(1)	26.70	23.60	34.19	1.93
SoilT_A(2)	28.08	25.69	32.73	1.33
SoilT_A(3)	28.17	26.03	31.60	1.15
SoilT_A(4)	26.93	25.31	30.00	1.14
SoilT_B(1)	26.75	23.58	37.42	2.17
SoilT_B(2)	28.16	25.83	33.28	1.30
SoilT_B(3)	28.11	26.33	31.63	1.00
SoilT_B(4)	26.77	25.26	30.05	1.16
shf_(1)	8.12	-2.18	648.90	31.31
shf_(2)	10.88	-48.52	140.10	20.34

1) Correlation Matrix.

In the correlation matrix, it is observed that most of the variables are correlated with each other (Fig. 6), which is appropriate for further analysis. Furthermore, the value of the determinant is 0.00, which proves that the correlation matrix is different from an identity matrix.

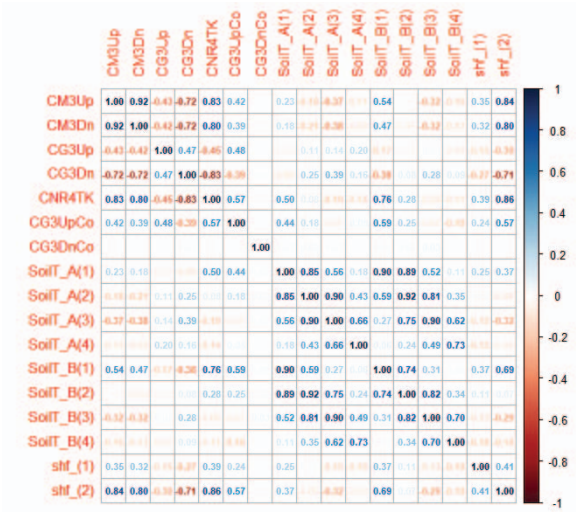


Fig. 6. Correlation Matrix of meteorological variables related to energy fluxes. Source: Own elaboration using R statistic software.

2) Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) and Bartlett's Test.

Table 8 presents the statistics corresponding to the study of sample fit to the model. We can see that the sample fit to this analysis is desirable and presents a very good fit to the data, since the KMO statistic, which indicates the proportion of the variance that the variables analyzed have in common, presents a value of 69.7%. Furthermore, Bartlett's Test of Sphericity shows that the critical level is 0.000, so the fit of the variables is also appropriate.

TABLE VIII. KMO AND BARTLETT'S TEST

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy		0.697
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	406731,473
	Df	136
	Sig	0.000

3) PCA.

Analyzing the total variance explained (Table 9), we find that the first component explains 40.55 % of the variance, the second component 28.22 %, and the third component 9.46 %, obtaining with these first three components 78.23 % of the accumulated variance.

TABLE IX. EIGENVALUES AND PERCENTAGE OF EXPLAINED VARIANCE BY EACH COMPONENT

Component	*Eigenvalue*	*Variance Explained*	*Cumulative proportion of variance*
PC1	6.893	40.550	40.550
PC2	4.797	28.217	68.766
PC3	1.609	9.464	78.230
PC4	1.000	5.882	84.112
PC5	0.942	5.544	89.656
PC6	0.658	3.870	93.526
PC7	0.522	3.070	96.596
PC8	0.248	1.461	98.057
PC9	0.108	0.635	98.691
PC10	0.077	0.450	99.142
PC11	0.064	0.377	99.519
PC12	0.053	0.312	99.831
PC13	0.017	0.100	99.931
PC14	0.007	0.042	99.973
PC15	0.003	0.020	99.993
PC16	0.001	0.006	100.00
PC17	0.000	0.000	100.00

The same criterion of obtaining three principal components would be explained in the Sedimentation Graph, according to which the distribution flattens out from the addition of the fourth principal component (Fig. 7).

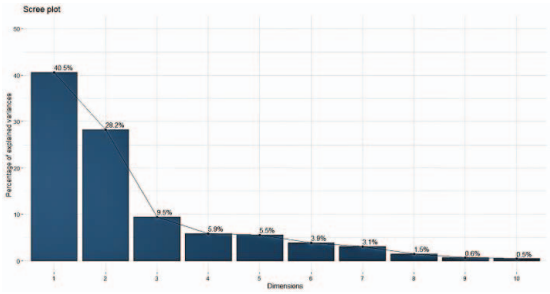


Fig. 7. Scree plot. Source: Own elaboration using R statistic software.

The loading matrix of PCA (Table 10) indicates the contribution of each variable in each component. For clarity, loadings with a magnitude > 0.5 are shown in boldface. The first factor can be labeled as "energies" with high values for shortwave radiation and heat fluxes in the soil. The second factor can be labeled as "soil temperature", which has high values for all soil temperatures at any depth. Finally, the third factor only correlates with the incident radiation variables, so we can label it as the variable's name.

TABLE X. LOADING MATRIX OF PCA.

Variable	*PC1*	*PC2*	*PC3*
CM3Up	**0.911**	-0.047	-0.193
CM3Dn	**0.879**	-0.075	-0.232
CG3Up	0.395	0.056	**0.741**
CG3Dn	**-0.818**	0.114	0.271
CNR4TK	**0.945**	0.213	-0.091
CG3UpCo	**0.561**	0.258	0.594
CG3DnCo	-0.009	0.026	0.018
SoilT_A(1)	0.368	**0.849**	0.232
SoilT_A(2)	-0.117	**0.953**	0.133
SoilT_A(3)	-0.405	**0.879**	-0.116
SoilT_A(4)	-0.252	**0.534**	-0.320
SoilT_B(1)	0.678	**0.674**	0.173
SoilT_B(2)	0.080	**0.941**	0.098
SoilT_B(3)	-0.334	**0.865**	-0.209
SoilT_B(4)	-0.293	**0.532**	-0.604
shf_(1)	0.487	0.057	0.163
shf_(2)	**0.927**	0.059	-0.002

4) PCA graph.

In Fig. 8 the energy variables are represented in the first two components. However, these components do not sufficiently well represent the variables close to the circle's center. In this case, all variables are well represented by these two dimensions (except the variables CG3UP and CG3DnCo which, as shown in the table above, are mainly explained by the third and fourth components. Note that all mangrove soil temperature variables measured at different depths are well represented in the first component and correlated with each other. On the other hand, the radiation parameters present in a mangrove are mainly explained by the second component.

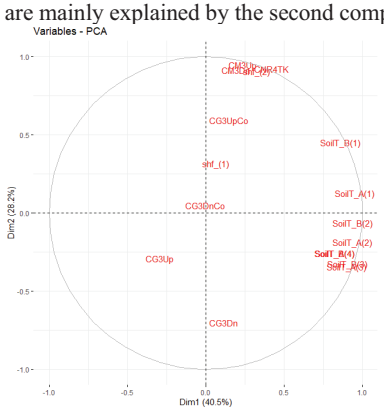


Fig. 8. PCA graph. Source: Own elaboration using R statistic software.

IV. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Mangroves are listed as one of the most vulnerable ecosystems to global change [18-20], due to their fragility and location, which makes them susceptible to climate change [21]. In [22] we can find that the increase in temperatures, associated with global warming, has caused a decrease in mangrove growth. Given this reality, this research has made it possible to characterize a mangrove forest in relation to its meteorological and energy flow parameters. Although the objectives have been achieved, a great discrepancy was found in the measurements of the

variables studied, due to the data acquisition system at the stations. As some authors point out, the disparity in the measurements of meteorological variables could be due to the longevity of the equipment and the lack of maintenance [23]. Still, it may also be caused by sensor failures or power failures at the stations [24]. In this sense, meteorological measurements must be carried out systematically with the highest possible accuracy so that the variables obtained can be considered homogeneous and representative.

PCA has identified some characteristics of meteorological and energy variables that play a prominent role in classifying mangroves. This result shows that the meteorological variables most similar to a mangrove ecosystem are temperature and wind speed, in agreement with [25]. Regarding energy flow, ground temperature and measurements of shortwave and longwave solar radiation are important, which has led researchers to study solar radiation to establish the efficiency of solar energy resources [26].

Finally, this research can be considered a starting point in the integral study of the Juan Díaz mangrove ecosystem, within a multidisciplinary and high scientific level framework, which facilitates the generation of statistical indicators and stakeholder decision-making.

ACKNOWLEDGMENT

The National Research System of Panama funded this research, the Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) with the Project FIED21-18 and the Panama Research and Integrated Sustainability Model (PRISM) Small Grants of the McGill Sustainability Systems Initiative. The authors would like to thank the "Programa de Saneamiento de Panamá" and the "Servicio Nacional Aeronaval" of Panama for supporting the field trips and downloading the data from the meteorological tower located in the Juan Diaz mangrove, presented in this paper.

REFERENCES

[1] Spalding M, Blasco F, Field C. World mangrove atlas. 1997; pp.178.

[2] Giri C, Ochieng E, Tieszen LL, Zhu Z, Singh A, Loveland T, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. Glob Ecol Biogeogr. 2011;20(1), pp. 154–9.

[3] Yáñez-Arancibia A, Lara-Dominguez AL. Ecositemas de Manglar en América Tropical. Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología, A.C. 1999. Centro SEP - CONACYT; 1999, pp. 380.

[4] Cárdenas Castillero G. Entorno socio-ambiental y calidad de agua del área protegida. Panamá: Editora Sibauste; 2018, pp. 197.

[5] Autoridad Nacional de Ambiente. Manglares de Panamá: Importancia, Mejores Prácticas y Regulaciones Vigentes. Panama: Editora Novo Art, S.A.; 2013.

[6] Autoridad Nacional del Ambiente y Banco Interamericano de Desarrollo. Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá 2010-2030. Panama; 2011.

[7] Bouillon S, Borges A V., Castañeda-Moya E, Diele K, Dittmar T, Duke NC, et al. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. Global Biogeochem Cycles [Internet]. 2008 Jun 1 [cited 2022 May 19];22(2). Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007GB003052

[8] Alongi DM. Carbon Cycling and Storage in Mangrove Forests. Ann Rev Mar Sci [Internet]. 2014 Jan 3 [cited 2022 May 19];6:195–219. Available from: https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-marine-010213-135020

[9] Kelleway JJ, Saintilan N, Macreadie PI, Skilbeck CG, Zawadzki A, Ralph PJ. Seventy years of continuous encroachment substantially increases "blue carbon" capacity as mangroves replace intertidal salt marshes. Glob Chang Biol. 2016; 22(3), pp. 1097–109.

[10] Alongi DM, Mukhopadhyay SK. Contribution of mangroves to coastal carbon cycling in low latitude seas. Agric For Meteorol. 2015;213(March), pp. 266–72.

[11] NASA Study Maps the Roots of Global Mangrove Loss | NASA [Internet]. [cited 2022 May 18]. Available from: https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/nasa-study-maps-the-roots-of-global-mangrove-loss

[12] Goldberg L, Lagomasino D, Thomas N, Fatoyinbo T. Global declines in human-driven mangrove loss. Glob Chang Biol. 2020 Oct 1;26(10), pp.5844–55.

[13] Gonzalez J, Tejedor-Flores N, Pinzon R. A bibliographic review of the importance of carbon dioxide capture in mangroves. Proc - 2019 7th Int Eng Sci Technol Conf IESTEC 2019. 2019, pp. 126–31.

[14] Ministerio de Ambiente. Contribución Dterminada a Nivel Nacional de Panmá (CDN1) [Internet]. 2020. Available from: https://cdn1.miambiente.gob.pa/informe/

[15] Panamá amplía los límites de Bahía de Panamá | Ramsar [Internet]. [cited 2022 May 19]. Available from: https://www.ramsar.org/es/nuevas/panama-amplia-los-limites-de-bahia-de-panama

[16] Kauffman JB, Donato DC. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86. Bogor, Indomesia, 2012.

[17] Harris P, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted principal components analysis. Int J Geogr Inf Sci. 2011; 25(10), pp. 1717–36.

[18] Aguirre Cruz, L. Plan para la conservación del manglar en la comunidad de El Carrizal Coyuca de Benítez, Guerrero (Master's thesis, Universidad Autónoma de Guerrero (México)), 2018.

[19] Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N. y Fatoyoinbo, T. Global declines in human-driven mangrove loss. Global Change Biology, 2020; 26, pp. 5844–5855. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15275

[20] Thomas, N., Lucas, R., Bunting, P., Hardy, A., Rosenqvist, A. y Simard, M. Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996–2010. PLoS ONE, 2017; 12(6). DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179302

[21] Takahashi, K., Martínez, A., 2015. Impacto de la variabilidad y cambio climático en el ecosistema de Manglares de Tumbes, Perú. Informe Técnico. Instituto Geofísico del Perú; Ministerio del Ambiente. Lima, Perú.

[22] Mendoza-Pérez, C., Vitola-Quintero, M., Rojas-Sáenz, V., & Valencia-Rosas, D. Diseño de un Sendero Ecológico como Estrategia Pedagógica para Promover el Conocimiento del Ecosistema de Manglar en la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Revista Científica

Anfibios, 2020; 3(2), pp. 83-92. https://doi.org/10.37979/afb.2020v3n2.76)
[23] Medina, L., Varela, R., & Velásquez, F. Comparación de la temperatura, precipitación, velocidad media y dirección del viento medidas por dos estaciones meteorológicas, ubicadas en Punta de Piedras, isla de Margarita. Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales, 2017; 74(181-182), pp. 61-80.
[24] Delgado-Balbuena, J., Yépez, E. A., Paz-Pellat, F., Ángeles-Pérez, G., Aguirre-Gutiérrez, C., Alvarado-Barrientos, M. S., et al. Base de datos de flujos verticales de dioxido de carbono en ecosistemas terrestres y costeros en México. Elementos para Políticas Públicas, 2019; 2(2), pp. 93–108.
[25] Escamilla, C. R. Correlación temporal de cobertura de bosque de manglar con variables ambientales en El Palmar Yucatán. 2017.
[26] J. Fan et al., "Empirical and machine learning models for predicting daily global solar radiation from sunshine duration: A review and case study in China," Renew. Sustain. Energy Rev., 2018; 100, pp. 186–212, 2018.

What environmental sustainability practices do universities manage for sustainable development

¿Qué prácticas de sostenibilidad ambiental gestionan las universidades para el desarrollo sostenible?

Mitzi Cubilla-Montilla
Depto. de Estadística, Universidad de Panamá
Sistema Nacional de Investigación, SENACYT
Panamá, Panamá
mitzi.cubilla@up.ac.pa

Carlos Torres-Cubilla
Department of Data Analytics
Banco General, Panamá City
Panamá, Panamá
ctorres@bgeneral.com

Nathalia Tejedor-Flores
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigación, SENACYT
Panamá, Panamá
nathalia.tejedor@utp.ac.pa

***Abstract*—The desire of universities to promote environmental sustainability is reflected in initiatives that seek to implement policies to promote green and sustainable campuses, not only in environmental issues but also in social and economic aspects, thus covering the three dimensions of sustainability. In this sense, several approaches have been developed; among these, we can mention the UI GreenMetric University Ranking, an international reference, developed in 2010, by the University of Indonesia. Considering the results of said ranking, there has been an increase in the number of participating universities. Therefore, this article has two purposes; on the one hand, to analyze whether, over the last seven years (2015-2021) there have been significant variations between the categories that make up the UI GreenMetric world sustainability ranking; on the other hand, to establish possible relationships between these categories. For this, a multivariate statistical method has been used; in this case, STATIS Dual allows universities to be analyzed simultaneously in the established period in the different world ranking categories. The results show favorable changes throughout the study period, in five of the six ranking categories. Furthermore, the study shows that the categories Education, Transport, Water, Waste and Energy, and Climate Change correlate. The Water and Waste categories are the ones that provide the most information, in the search for sustainability. We hope that our results are useful for decision-makers in universities.**

Keywords*—*sustainable development, environment, university, green campuses, GreenMetric, multivariate analysis, Statis Dual.

***Resumen*— El deseo de las universidades de promover la sostenibilidad medio ambiental, se ve reflejado en iniciativas que buscan implementar políticas para promover campus verdes y sostenibles; no solo en temas ambientales, sino también en aspectos sociales y económicos, cubriendo así las tres dimensiones de la sostenibilidad. En este sentido, se han desarrollado varios enfoques, entre estos podemos mencionar el Ranking de Universidades UI GreenMetric, un referente internacional, desarrollado en el año 2010, por la Universidad de Indonesia. A la luz de los resultados de dicho ranking, se ha dado un aumento en el número de universidades participantes. El presente artículo tiene dos propósitos; por un lado, analizar si a lo largo de los últimos siete años (2015-2021) se han dado variaciones significativas entre las categorías que componen el ranking mundial de sostenibilidad UI GreenMetric; por otro lado, establecer posibles relaciones entre dichas categorías. Para ello, se ha utilizado un método estadístico multivariante; en este caso STATIS Dual, que permite analizar simultáneamente las universidades en el periodo de tiempo establecido, en las diferentes categorías del ranking mundial. Los resultados evidencian cambios favorables a lo largo del periodo en estudio, en cinco de las seis categorías del ranking. El estudio, pone de manifiesto que las categorías Educación, Transporte, Agua, Residuos y Energía, y Cambio Climático están estrechamente correlacionadas entre sí. Las categorías Agua y Residuos son las que más información aportan, en la búsqueda de la sostenibilidad. Aspiramos a que nuestros resultados sean de utilidad para los tomadores de decisiones en universidades.**

Palabras claves*—*desarrollo sostenible, medio ambiente, universidad, campus verdes, GreenMetric, análisis multivariado, Statis Dual.

I. INTRODUCCION

El cuidado del ambiente y la protección de los recursos naturales no es tarea exclusiva del estado. Las universidades son espacios donde coinciden actores con una enorme responsabilidad social. En este sentido, a nivel mundial las instituciones de educación superior no solo contribuyen al desarrollo académico y científico de la sociedad [1], [2], también sirven de modelo para gestionar una cultura orientada hacia el desarrollo sostenible [3], [4]. Precisamente, las universidades han adoptado dentro de sus estrategias medioambientales, políticas sostenibles para conseguir campus verdes [5], [6] y proyectarse mejor en la sociedad [7].

Así, la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [8] enfatiza fuertemente en la excelencia de la educación para elevar el pensamiento sobre el desarrollo sostenible. De allí que el concepto de campus, bajo el tratamiento de universidades verdes se enmarque en el concepto de sostenibilidad [9], [10]. A pesar de que se han realizado diversas investigaciones sobre campus verdes, no se han encontrado estudios que analicen el comportamiento medioambiental de universidades en tres vías (campus universitario, rango de años y variables).

Lo novedoso de esta investigación, por tanto, consiste en proponer un enfoque diferente a los métodos tradicionales de análisis, utilizando herramientas estadísticas multivariantes, a

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00077

través del STATIS Dual. Mediante esta técnica podemos visualizar y optimizar la interpretación de la información proporcionada por los datos.

El objetivo principal de este artículo consiste en analizar si a lo largo de los años (2015-2021) se han producido variaciones significativas en los aspectos que componen el ranking de sostenibilidad de las instituciones de educación superior. Paralelamente, este método estadístico nos permite inferir relaciones entre las diferentes categorías que componen el ranking mundial de sostenibilidad.

El artículo se organiza en cinco secciones principales. La primera sección contiene una breve introducción al tema y explica el ranking mundial de sostenibilidad; la segunda sección presenta los materiales y métodos utilizados; la tercera sección contiene los principales hallazgos dele estudio y la cuarta sección presenta las discusiones y conclusiones de la investigación.

Clasificación mundial de universidades. UI GreenMetric

Para apreciar y reconocer las iniciativas que han implementado las universidades comprometidas firmemente con los esfuerzos sostenibles [11], se han creado diferentes rankings [12]. En el año 2010, la Universidad de Indonesia creó una clasificación mundial de universidades, conocida como UI GreenMetric (https://greenmetric.ui.ac.id), con el objetivo de ofrecer un marco de trabajo para medir las condiciones y políticas relacionadas con la sostenibilidad en las universidades del mundo. El ranking sienta las bases para que cada universidad evalúe sus fortalezas y debilidades en torno al cuidado del medio ambiente y promueva una cultura de sostenibilidad [9]. El concepto de universidad sostenible se inspira en la noción de sostenibilidad ambiental que contiene los siguientes elementos: económico, social y ambiental [13].

GreenMetric se considera el ranking mundial de sostenibilidad más importante para las universidades y evalúa en base a seis categorías que se ponderan según su importancia en la conformación del Ranking (ver Tabla I).

Se ha verificado que la mayoría de los indicadores que componen el ranking UI GreenMetric están conformes con los Principios de Berlín.

Tabla I. Ponderaciones de las categorías del UI GreenMetric

Categoría	***Máximo de puntos***	***Peso (%)***
Entorno e infraestructura	1500	15
Energía y cambio climático	2100	21
Residuos	1800	18
Agua	1000	10
Transporte	1800	18
Educación	1800	18
TOTAL		100

Fuente: UI GreenMetric.

A lo largo de los últimos años, los indicadores del ranking GreenMetric han sido objeto de estudio por investigadores, bajo diferentes enfoques. Uno de los más recientes compara la estructura del GreenMetric con la clasificación académica de universidades del Times Higher Education World [14]; en otro se revela la relación entre el desempeño académico de las universidades y ser verde [15].

Por otro lado, se ha evaluado el desempeño sostenible en universidades; por ejemplo, en Turquía [16], en institutos de la India [17] y en universidades brasileñas [18]. Desde otra perspectiva, se realizó un análisis constructivo del Ranking GreenMetric con el fin de mejorar y fortalecer el método de clasificación de las universidades [19].

II. MATERIALES Y METODOS

A. Población y muestra

Para abordar con éxito los objetivos de esta investigación y reconocer la utilidad del método implementado en el análisis de datos de tres vías, se utilizaron los datos del ranking mundial de universidades GreenMetric, que son reportados anualmente en su sitio web [20]. El tamaño de la muestra quedó establecido en función de las universidades que reportaron todas sus categorías durante el periodo 2015-2021.

La información ha sido sistematizada en función de los países, años de estudio y categorías del ranking GreenMetric.

B. Variables para el análisis

En la siguiente tabla (ver Tabla II) se presenta una descripción de las variables utilizadas en esta investigación.

Tabla II. Descripción de las categorías del UI GreenMetric

Categorías	***Descripción***
Entorno e infraestructura	Aporta información de la política universitaria en términos de protección del medio ambiente y desarrollo de energías renovables.
Energía y cambio climático	Se basa en las medidas adoptadas en cuanto al uso de recursos energéticos y la práctica de estrategias para luchar contra el cambio climático.
Residuos	Promueve el tratamiento adecuado de los desechos y gestiona acciones de reciclaje de residuos, en ruta hacia un medio ambiente sostenible.
Agua	Busca disminuir el consumo del agua y aumentar los programas de conservación del recurso hídrico.
Transporte	Fomenta políticas y planes para una movilidad sostenible.
Educación	Se fundamenta en la idea de que la universidad debe promover la formación de nuevas generaciones interesadas en la sostenibilidad del medio ambiente.

C. Análisis Estadístico

En este apartado se presenta el análisis descriptivo de cada una de las categorías del ranking GreenMetric. Luego, se implementa el método multivariante de tres vías STATIS Dual [21] para analizar el comportamiento de los componentes del ranking y examinar su evolución a través del tiempo.

El STATIS Dual es un método de análisis multivariante que permite el tratamiento simultáneo de varias tablas de datos que han sido medidas en diferentes momentos, en nuestro caso, en años. Los datos consisten en varios conjuntos de observaciones medidas en el mismo conjunto de variables.

Esta herramienta consta de tres fases: la interestructura, el compromiso y la intraestructura (ver Fig. I).

La primera fase es el estudio de la *interestructura*, que consiste en hacer una comparación general entre las siete tablas de datos, donde cada tabla representa un año. Esta fase tiene la finalidad de estudiar la relación entre los diferentes años y ver si se ha dado alguna variación a lo largo del tiempo. Cada tabla, es decir, cada año se representa como un punto en un subespacio euclidiano de baja dimensión; conectando cada uno de estos puntos con el origen y evaluando los ángulos entre vectores se obtiene una estimación de correlación entre las variables, en nuestro caso, entre las categorías del ranking.

La segunda fase sintetiza la información que se encuentra en las siete tablas de datos, en una sola matriz, conocida como *matriz compromiso,* cuya descomposición en valores y vectores singulares, proporciona una imagen euclídea en un espacio de baja dimensión. Esta representación pone de manifiesto la similitud/disimilitud entre las diferentes categorías del GreenMetric objeto de estudio.

La tercera fase consiste en comparar las columnas de la secuencia de matrices de productos cruzados con los de la matriz compromiso. En este punto es deseable saber si dichas matrices son similares no al compromiso. Esta etapa es llamada usualmente como intraestructura, pero también se le conoce como trayectoria.

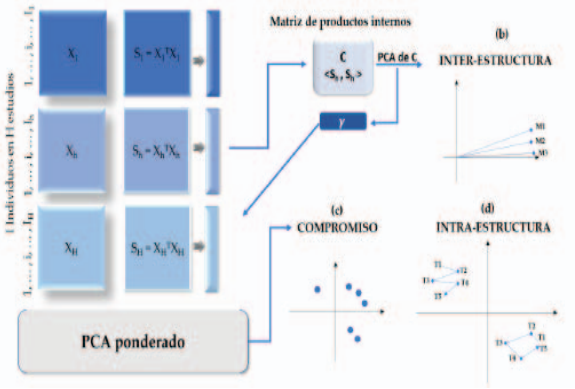


Fig. I. Esquema del STATIS Dual. Source: [22].

III. RESULTADOS

A. *Análisis Exploratorio*

Desde el punto de vista descriptivo (ver Tabla III), se observa que la categoría "Residuos" tuvo el promedio más alto (987), seguida de la categoría "Energía y cambio climático", con un puntaje de 92. Sin perder de vista que teóricamente el puntaje máximo de la categoría "Agua" es de 1000 puntos, se alcanzó un puntaje promedio de 475 en dicha categoría. Respecto al puntaje máximo, las categorías "Residuos", "Agua", "Transporte" y "Educación" alcanzaron cada una su puntaje máximo. Todas las categorías del ranking marcaron el puntaje mínimo posible de cero.

Finalmente, se puede destacar que en la categoría "Residuos" se observa una elevada desviación estándar respecto al resto de las categorías.

Tabla III. Resumen de Estadísticas

Categoría	Media	Máximo	Desviación Estándar
Entorno e infraestructura	752	1450	274
Energía y Cambio climático	927	2025	364
Residuos	987	1800	444
Agua	475	1000	252
Transporte	903	1800	349
Educación	891	1800	423

B. *STATIS Dual*

1) *Interestructura*

El primer paso del STATIS-Dual es comparar las estructuras de los diferentes años a través del análisis interestructural de tres modos (1er modo: 950 universidades, 2do modo: 6 variables, 3er modo: 7 años). Este análisis proporcionó una estimación gráfica del coeficiente de correlación entre matrices, es decir, entre los años (Fig. II). Esta representación exhibe similitudes estructurales a lo largo de los años (2015-2020), aunque se observa una ligera separación del año 2020 con el resto de la serie histórica. Una conclusión positiva de este análisis es que valida la elección de las categorías que conforman el ranking ya que están fuertemente correlacionados independientemente del año y contiene alrededor del 94% de la información en el plano factorial 1-2.

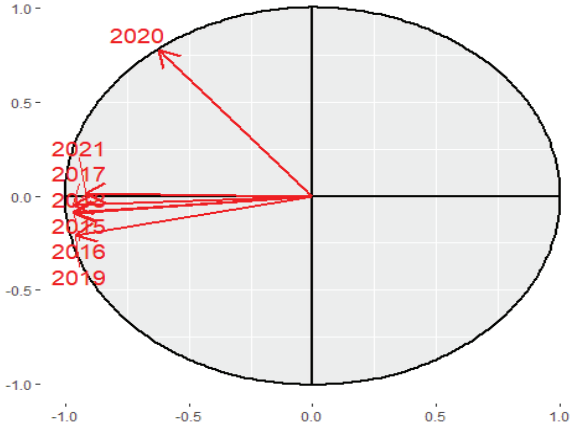


Fig. II. Representación de la interestructura STATIS Dual

2) *Compromiso*

El segundo paso del análisis es la creación de la matriz compromiso. Esta matriz constituye una visión global de todas las tablas, y por lo tanto resume toda la información recogida durante el periodo de estudio. Esto significa que en el subespacio creado por la matriz compromiso, cada universidad está representada por un valor que sintetiza la información sobre los siete años y las cinco variables.

La representación en los dos primeros ejes factoriales recoge alrededor del 71% de la información, y todos los años se ponderan de manera bastante similar en el compromiso (Tabla IV, columna "Peso"), con excepción del año 2020 que lo hace en menor medida.

Tabla IV. Pesos y calidad de representación de cada matriz en el compromiso

Año	Peso
2015	0.1704
2016	0.1709
2017	0.1715
2018	0.1718
2019	0.1695
2020	**0.1101**
2021	0.1628

Esta información se representa en la Figura III, donde se muestra la proyección de la matriz compromiso para explorar el promedio de las categorías en el periodo 2015-2021. Las categorías más relevantes quedan representadas en el primer eje factorial, quedando de manifiesto que Educación, Transporte, Agua, Residuos y Energía, y Cambio Climático están estrechamente correlacionadas entre sí; en tanto, Entorno e Infraestructura parecen relacionarse con éstas en menor medida. Cabe destacar que las categorías "Agua" y "Residuos" son las que presentan mayor variabilidad, por lo tanto, las que más información aportan en la búsqueda de la sostenibilidad en las universidades.

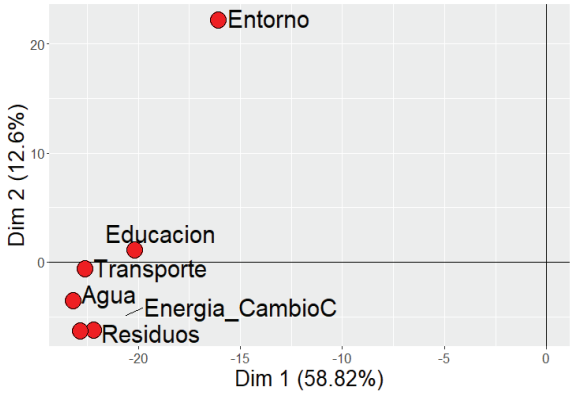


Fig. III. Representación del compromiso STATIS Dual

3) Trayectorias

Un paso fundamental del análisis STATIS-dual es el estudio de las trayectorias, que describe la evolución de las categorías de manera individual de 2015 a 2021, identificando los cambios que se dieron en el tiempo (ver Fig. IV). Una trayectoria envolvente –poca variación- indica que dicha categoría no ha presentado cambios en el tiempo; mientras que una trayectoria de mayor amplitud, indica que la categoría correspondiente ha experimentado cambios en el tiempo. La Figura 3 ilustra estas trayectorias en el subespacio del compromiso. Se evidencia que las universidades han presentado cambios favorables en todas las categorías a lo largo del periodo en estudio, aunque algo menos para la categoría Educación (trayectoria envolvente).

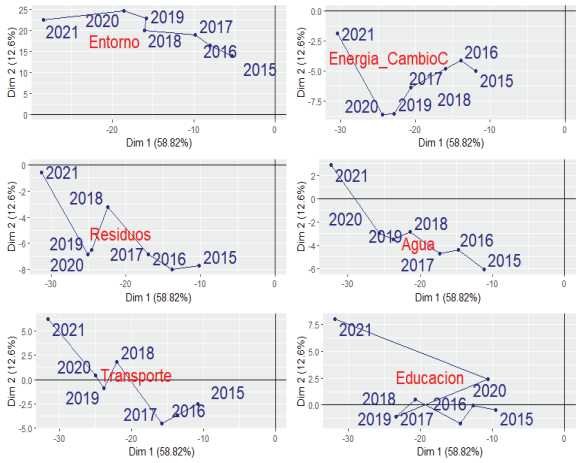


Fig. IV. Representación de la interestructura STATIS Dual

IV. Discusión y Conclusiones

La aplicación de la técnica multivariante STATIS Dual, ha permitido cumplir con nuestro objetivo de analizar el comportamiento progresivo del ranking GreenMetric, observándose una estructura similar a lo largo de los años (2015-2020), con una ligera variación en el año 2020 respecto a la serie estudiada. Apoyamos la idea de que esta variación pudo obedecer a los cambios y ajustes que realizaron las instituciones educativas a raíz de la pandemia de COVID-19.

Respecto a las categorías que conforman el ranking, podemos destacar que Educación, Transporte, Agua, Residuos, Energía, y Cambio Climático están estrechamente relacionadas, esto quiere decir que hay un esfuerzo por parte de las instituciones en atender conjuntamente estas categorías; en tanto, Entorno e Infraestructura parecen relacionarse en menor medida con el resto de las categorías, lo que hace suponer que es un aspecto que se maneja de forma separada. Concluimos que este factor debe integrarse conjuntamente al resto de las categorías en la búsqueda del camino hacia la sostenibilidad a lo interno de las universidades.

En función de las trayectorias, los resultados apuntan cambios favorables en todas las categorías del ranking, con excepción de la categoría Educación, que muestra poca variación en el periodo estudiado.

Finalmente, defendemos la idea de que los rankings, como es este caso el ranking GreenMetric, llevan a cabo una labor institucional en la globalización de la educación superior al construir una lista de universidades de "clase mundial" [23]. Además, si estos rankings son mundialmente reconocidos y utilizados, estos estándares, contribuyen al establecimiento de la pertenencia y de la distinción de la universidades que lo utilizan [24], pero, también, imponen normas, reglas y criterios a aquellas universidades que quieren ser reconocidas por ellos deben optar y quienes son los encargados de crear las políticas quieren saber dónde están ubicadas las mejores universidades y dónde se necesitan mejoras para competir nacional y organizacionalmente dentro del campo internacional, impactando, las inversiones acordes con las reglas del juego de las clasificaciones a medida que todos se esfuerzan por mejorar su posición competitiva [25].

AGRADECIMIENTO

Esta investigación fue financiada por el Sistema Nacional de Investigación de Panamá, Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT).

REFERENCIAS

[1] D. de Filippo, L. A. Sandoval-Hamón, F. Casani, and E. Sanz-Casado, "Spanish Universities' sustainability performance and sustainability-related R & D+I," Sustainability (Switzerland), vol. 11, no. 20, Oct. 2019, doi: 10.3390/su11205570.

[2] S. Caeiro, L. A. S. Hamón, R. Martins, and C. E. B. Aldaz, "Sustainability assessment and benchmarking in higher education institutions-a critical reflection," Sustainability (Switzerland), vol. 12, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12020543.

[3] B. Karatzoglou, "An in-depth literature review of the evolving roles and contributions of universities to Education for Sustainable Development," Journal of Cleaner Production, vol. 49, pp. 44–53, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2012.07.043.

[4] H. M. Alshuwaikhat, Y. A. Adenle, and B. Saghir, "Sustainability assessment of higher education institutions in Saudi Arabia," Sustainability (Switzerland), vol. 8, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.3390/su8080750.

[5] N. Suwartha and M. A. Berawi, "The role of Ui greenmetric as a global sustainable ranking for higher education institutions," International Journal of Technology, vol. 10, no. 5, pp. 862–865, 2019, doi: 10.14716/ijtech.v10i5.3670.

[6] M. Muñoz-Suárez, N. Guadalajara, and J. M. Osca, "A comparative analysis between global university rankings and environmental sustainability of universities," Sustainability (Switzerland), vol. 12, no. 14, pp. 1–19, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12145759.

[7] W. L. Filho, C. Shiel, A. do Paço, and L. Brandli, "Putting Sustainable Development in Practice: Campus Greening as a Tool for Institutional Sustainability Efforts," in Sustainability in higher education , Chandos Publishing, 2015, pp. 1–19. doi: 10.1016/B978-0-08-100367-1.00001-9.

[8] "United Nations Sustainable Development Summit 2015 .:. Sustainable Development Knowledge Platform."

[9] E. B. Ali and V. P. Anufriev, "UI greenmetric and campus sustainability: A review of the role of African universities," International Journal of Energy Production and Management, vol. 5, no. 1, pp. 1–13, Mar. 2020, doi: 10.2495/EQ-V5-N1-1-13.

[10] E. Tezel and H. Giritli, "Towards Green Campuses: Students' Perceptions and Expectations", Accessed: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329044114

[11] T. Grindsted, "Sustainable universities-from declarations on sustainability in higher education to national law," Environmental economics, vol. 2, no. 2, 2011.

[12] R. Puertas and L. Marti, "Sustainability in universities: DEA-GreenMetric," Sustainability (Switzerland), vol. 11, no. 14, 2019, doi: 10.3390/su11143766.

[13] I. Hordijk, "Position paper on sustainable universities.," Cleaner Production, vol. 14, no. 9, pp. 810–819, 2014.

[14] B. Galleli, N. E. B. Teles, J. A. R. dos Santos, M. S. Freitas-Martins, and F. Hourneaux Junior, "Sustainability university rankings: a comparative analysis of UI green metric and the times higher education world university rankings," International Journal of Sustainability in Higher Education, vol. 23, no. 2, pp. 404–425, Feb. 2022, doi: 10.1108/IJSHE-12-2020-0475/FULL/XML.

[15] K. B. Atici, G. Yasayacak, Y. Yildiz, and A. Ulucan, "Green University and academic performance: An empirical study on UI GreenMetric and World University Rankings," Journal of Cleaner Production, vol. 291, p. 125289, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125289.

[16] K. E. Maçin, "UI GreenMetric Ranking Performance Analysis of Universities in Turkey: Suggestions Towards to Becoming Green Campuses", Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/357159072

[17] N. Parvez and A. Agrawal, "Assessment of sustainable development in technical higher education institutes of India," Journal of Cleaner Production, vol. 214, pp. 975–994, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.305.

[18] A. D. Drahein, E. P. de Lima, and S. E. G. da Costa, "Sustainability assessment of the service operations at seven higher education institutions in Brazil," Journal of Cleaner Production, vol. 212, pp. 527–536, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.293.

[19] M. Ragazzi and F. Ghidini, "Environmental sustainability of universities: Critical analysis of a green ranking," in Energy Procedia, 2017, vol. 119, pp. 111–120. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.054.

[20] "UI GreenMetric." https://greenmetric.ui.ac.id/ (accessed Jul. 16, 2022).

[21] H. L'Hermier des Plantes, "Structuration des tableaux à trois indices de la statistique," Université de Montpellier II, 1976.

[22] C. C. Rodríguez-Martínez, M. Cubilla-Montilla, P. Vicente-Galindo, and P. Galindo-Villardón, "Sparse statis-dual via elastic net," Mathematics, vol. 9, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/math9172094.

[23] Zuñiga-Jara, S. & Sjoberg-Tapia, O. Gobierno corporativo y desempeño en las universidades chilenas. Revista Formación Universitaria, 14(1), 3-12. 2021. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000100003

[24] Villaseñor Becerra, J. I., Moreno Arellano, C. I. & Flores Orozco, J. E. Perspectivas actuales sobre los rankings mundiales de universidades. 2015. Revista RESU, 3(175), 41-67.

[25] Ganga-Contreras, F. A., Sáez San Martín, W., Rodríguez Ponce, E., Calderón, A. I. & Wandercil, M. Universidades públicas de Chile y su desempeño en los rankings académicos nacionales. Revista Fronteiras, 7(3), 316-341. 2018. Doi: http//dx.doi.org/10.21664/2238-8869.2018v7i3.

Evaluation of the microbial degradation of phenanthrene and pyrene in wastewater.

Evaluación del potencial de degradación microbiana de fenantreno y pireno en aguas residuales.

Marta Ruiz-Santaquiteria
Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Industrial
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, Spain
m.ruizsantaquiteria@upm.es

Ariel A. Grey G.
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
ariel.grey@utp.ac.pa

Yarisel González
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
yarisel.gonzalez1@utp.ac.pa

Cenobio Cárdenas
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
cenobio.cardenas@utp.ac.pa

Abstract—**Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) are one of the most important sources of environmental pollution worldwide. Their presence in water show a potential danger not only to the environment but also the health. In this work, a bacterial degradation study of phenantrene and pyrene in wastewater in the Victor Levi Sasso campus of Universidad Tecnológica de Panamá has been carried out.**

Keywords—***phenanthrene, pyrene, wastewater, contamination.***

Resumen—**Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) presentan un serio problema de contaminación ambiental. En concreto, la presencia de ellos en las aguas presenta un potencial peligro no sólo para el medio sino también para la salud. En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio para evaluar el potencial de degradación de fenantreno y pireno empleando las bacterias que se encuentran en las aguas residuales del campus Víctor Levi Sasso de la Universidad Tecnológica de Panamá, ya que estas bacterias pueden captar y asimilar estos compuestos orgánicos como fuentes de carbono.**

Palabras clave—fenantreno, pireno, aguas residuales, contaminación.

I. Introducción

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) son un tipo de compuestos orgánicos que presentan un gran problema en la actualidad por su potencial efecto contaminante en el medio ambiente, así como los efectos negativos que tienen para la salud. [1]. La exposición humana a los PAH se produce de diferentes fuentes como el humo de los cigarrillos, los gases de escape de los vehículos, la exposición a las emisiones industriales, desechos, combustibles e incluso el consumo de alimentos asados. Así, los seres humanos pueden estar expuestos a los PAH a través del aire, el agua o los alimentos ingeridos [2].

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, basados fundamentalmente en carbono e hidrógeno, adoptan diferentes estructuras en función de cómo se fusionen los anillos bencénicos que los componen. En este trabajo, se ha trabajado con dos tipos de PAH: fenantreno y pireno (Figura 1)

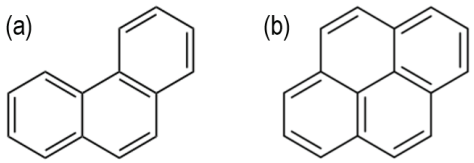


Figura 1. Estructuras del fenantreno (a) y pireno (b)

La solubilidad en agua de los PAH disminuye a la vez que aumenta el peso molecular de los mismos, debido al carácter apolar de estas estructuras. Tal es así, que hay estudios que determinan que los PAH con cuatro o cinco anillos aromáticos son prácticamente insolubles en agua [3], como es el caso del pireno utilizado en este estudio. Debido a esta característica, los PAH pueden adherirse a la superficie de la materia particulada y este mecanismo es la principal vía de transporte de los PAH desde la tierra y el aire hasta los sistemas acuáticos, así como desde la superficie del mar a las profundidades más bajas [4]. Por ello, en las últimas décadas se ha trabajado mucho en la eliminación de estos contaminantes en las aguas empleandoprocesos físico/químicos (coagulación, oxidación química, degradación fotocatalítica, adsorción…) y también biológicos [5].

En este trabajo se ha utilizado la capacidad degradadora de las bacterias presentes en aguas residuales para degradar

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00078

los hidrocarburos aromáticos policíclicos elegidos: fenantreno y pireno, ya que como se ha visto en estudios previos la concentración de estos contaminantes en aguas de desecho es bastante elevada [1].

II. Materiales y Métodos

Todos los experimentos realizados en este trabajo fueron realizados en el laboratorio de sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá.

La muestra de agua residual se tomó de la fosa séptica situada en el campus Víctor Levi Sasso de la Universidad Tecnológica de Panamá.

A) Procedimiento experimental de incubación de la muestra de agua con los contaminantes fenantreno y pireno.

Para todos los experimentos se utilizó peptona como medio de cultivo, cuya composición es la siguiente: 10g/L de peptona (incluye digerido enzimático de caseína), 5 g/L de cloruro sódico, 1.5 g/L de dihidrogenofostafo potásico y 9 g/L de hidrogenofosfato disódico dodecahidratado.

Todos los experimentos realizados se dejaron incubando en matraces Erlenmeyer en un agitador orbitálico (marca Thermo scientific) a 100 rpm y 37 ºC de temperatura. El agitador orbitálico se cubrió con papel manila para evitar que las muestras estuvieran expuestas a la luz solar.

Experimento 1: En el primer experimento se puso en un matraz Erlenmeyer 100 mL de agua peptonada (25 g/L), 30 mL de la muestra de agua residual recogida y 0.0566 g de fenantreno, y se dejó reaccionando 7 días en un agitador orbitálico.

Experimento 2: En el segundo experimento se colocó en un matraz Erlenmeyer 100 mL de agua peptonada (25 g/L), 30 mL de la muestra de agua residual recogida y 0.0566 g de fenantreno, y se dejó 5 días en el agitador orbitálico.

Experimento 3: En el tercer experimento se introdujo en un matraz Erlenmeyer 100 mL de agua peptonada (25 g/L), 30 mL de la muestra de agua residual recogida y 0.0346 g de pireno, y se dejó 5 días en un agitador orbitálico.

Primer pase del experimento 1: pasados 7 días desde que se preparó el experimento 1, se añadieron en un matraz Erlenmeyer 100 mL de agua peptonada (25 g/L), 30 mL de la mezcla del experimento 1 y 0.0566 g de fenantreno, y se dejó hasta el día siguiente en el agitador orbitálico.

Primer pase del experimento 2: pasados 5 días desde que se puso el experimento 2, se introdujo en un matraz Erlenmeyer 100 mL de agua peptonada (25 g/L), 30 mL de la mezcla del experimento 2 y 0.0566 g de fenantreno, y se dejó hasta el día siguiente en el agitador orbitálico.

Primer pase del experimento 3: pasados 5 días desde que se preparó el experimento 3, se colocaron en un matraz Erlenmeyer 100 mL de agua peptonada (25 g/L), 30 mL de la mezcla del experimento 3 y 0.0346 g de pireno, y se dejó hasta el día siguiente en el agitador orbitálico.

Al día siguiente se realizó un nuevo pase de cada uno de los experimentos, hasta realizar en total tres pases de cada uno de ellos en días sucesivos. Un esquema general del procedimiento que se llevó a cabo se ilustra en la Figura 2, poniendo como ejemplo el experimento 1.

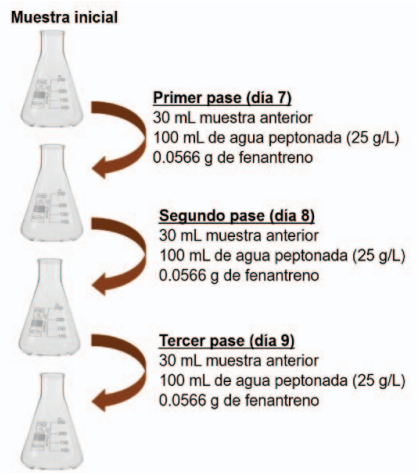


Figura 2. Esquema del procedimiento completo del experimento 1, desde la preparación inicial del mismo hasta completar los tres pases realizados.

B) Procedimiento experimental para el conteo y determinación del tipo de bacterias en la muestra.

En primer lugar, se prepara una mezcla de agar-agar (1.17 g) en 50 mL de agua destilada y se calienta con agitación hasta que hierva. Una vez que hierve la disolución se pone de color amarillo transparente y se tapa con papel manila y se deja reposar unos minutos a unos 40 ºC. Se echa esta mezcla en dos placas Petri hasta 1/3 de su capacidad, se tapan y se deja enfriar para que el agar-agar solidifique. A continuación, se añade la muestra realizando un sembrado por estrías. Se deja un par de minutos para que la muestra se absorba en el agar-agar y se lleva a una incubadora a 37 ºC hasta el día siguiente.

Tinción para determinar el tipo de bacterias

Con un asa de inoculación esterilizada, se realizó un frotis desde la muestra presente en la placa Petri sembrada el día anterior en una placa. Posteriormente, se añadió azul de bromotimol y después lugol (yodo de Gram) y se deja durante aproximadamente 1 minuto. Se lava con alcohol y agua y a continuación se añade safranina y se deja durante otro minuto más. Se lava con agua y se observa el resultado en el microscopio.

III. Resultados y Discusión

A) Resultados tras la incubación de la muestra de agua con los contaminantes fenantreno y pireno.

Una vez obtenida la muestra de agua, se llevaron a cabo tres experimentos en el laboratorio para ver la degradación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos fenantreno y pireno por las bacterias presentes en la muestra de agua residual. El procedimiento llevado a cabo se ha explicado en el apartado anterior 2.1.

El resultado del primer experimento, antes de realizar el primer pase se puede observar en la Figura 3.

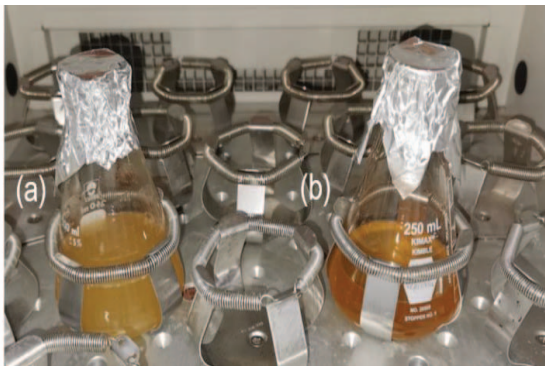


Figura 3. (a) Experimento 1 (agua peptonada+muestra agua residual+fenantreno) (b) referencia de agua peptonada.

En ambos matraces Erlenmeyer se puede ver una coloración anaranjada debida a la presencia del agua peptonada. Sin embargo, mientras que la muestra b está transparente (ya que únicamente posee agua peptonada), la muestra a (que contiene además la muestra de agua residual y fenantreno) presenta turbidez. Esto puede ser debido a que las bacterias presentes en el agua residual recogida podrían estar comenzando a crecer gracias al aporte de carbono que proviene del fenantreno.

Pasado el tiempo correspondiente (explicado para cada uno de los experimentos en el punto 2.1.), se realizó un pase de cada uno de los experimentos en un nuevo matraz.

Tras un día de incubación después de realizar el primer pase se pudo observar que mientras la referencia de agua peptonada tiene un color anaranjado transparente, las otras tres disoluciones que tienen muestra de agua residual presentan turbidez, lo que sigue indicando que existe crecimiento bacteriano (Figura 4).

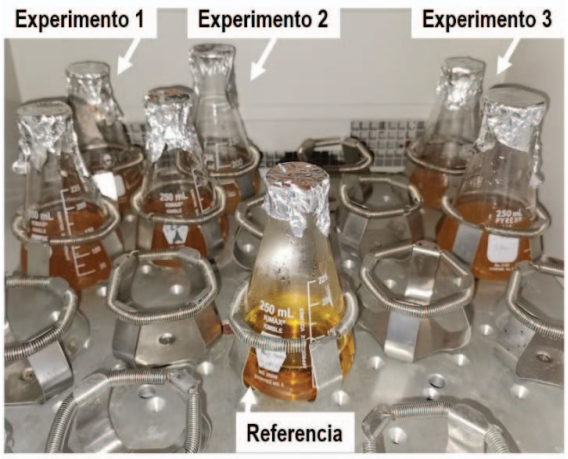


Figura 4. Resultado tras un día de incubación de los tres experimentos después de realizar el primer pase en cada uno de ellos, comparado con la referencia de agua peptonada.

En la Figura 5 se recogen todas las muestras preparadas (desde la muestra inicial y los tres pases sucesivos) de los tres experimentos realizados. Los experimentos 1 y 2 con fenantreno a 7 y 5 días de incubación, respectivamente, de la muestra inicialmente preparada, y el experimento 3 con pireno a 5 días de incubación de la muestra inicial. En todos ellos, se puede ver cómo con el paso del tiempo las disoluciones se han vuelto turbias, debido al crecimiento bacteriano.

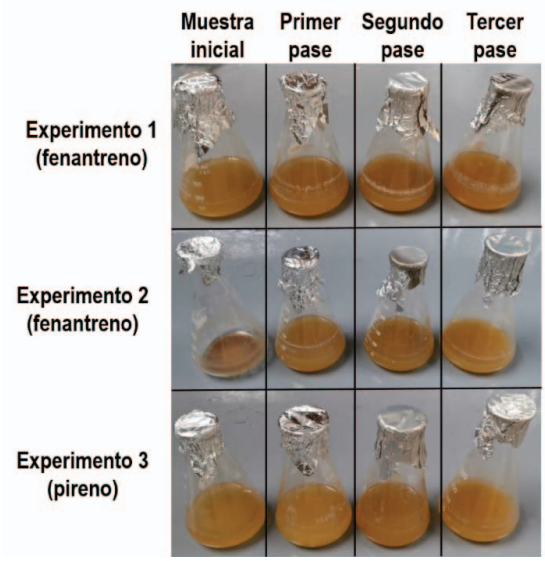


Figura 5. Matraces con las muestras de los experimentos 1, 2 y 3, desde las muestras inicialmente preparadas hasta el tercer pase.

B) Resultados del conteo y determinación del tipo de bacterias en las muestras.

Se analizaron los tipos de bacterias en las muestras incubadas de la muestra inicial tomada del agua residual y del agua tratada tras el tercer pase en los tres experimentos realizados. El procedimiento de cómo se realizó el sembrado se ha explicado el punto 2.2 de este trabajo.

Por un lado, se analizó el tipo de bacterias en la muestra recogida directamente de agua residual, añadiendo 0.5 mL de muestra en la placa Petri con el agar-agar. El resultado observado en el microscopio se recoge en la Figura 6, donde se puede ver claramente presencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas. Se distinguen diplobacilos (bacterias Gram positivas) en azul con forma alargada y esporas, también azules con el centro blanco. En rojo se pueden ver cocos (bacterias Gram negativas), ya que son rojos redondeados y de pequeño tamaño. Estos resultados estarían en consonancia con resultados publicados previamente en la bibliografía y también relacionados con experimentaciones previas realizadas por alguno de los.autores del presente trabajo. En un trabajo publicado por M.C. Vargas, donde estudiaban microorganismos capaces de degradar PAH´s, encontraron *pseudomonas stuterzi*, *pseudomonas aeruginosa* y *pseudomonas resinovorans*, bacterias Gram negativas [6]. Asimismo, en trabajos previos realizados por el Dr. A. Grey, coautor también del presente trabajo, en el que se aislaron bacterias degradadoras de hidrocarburos aromáticos en sedimentos de la Bahía de Manzanillo, se encontraron bacterias tanto Gram positivas como Gram negativas [7]. De igual manera ha sido registrado por otros autores el aislamiento de estas especies

en diferentes ambientes [8]. *Pseudomonas* es el género que con mayor frecuencia se aísla de ambientes contaminados con hidrocarburos [9] y de la cual mayor información ha sido registrada; se conoce su capacidad para crecer sobre una amplia variedad de hidrocarburos del petróleo como benceno, naftaleno, tolueno, gasolina, kerosene y diesel [10].

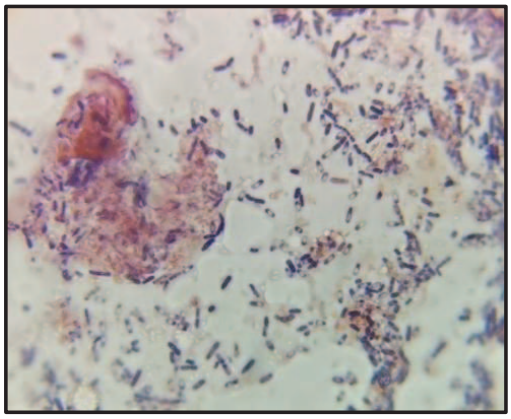


Figura 6. Muestra inicial de agua residual con bacterias Gram positivas (azul) y Gram negativas (rojo).

Por otro lado, una vez llevados a cabo todos los experimentos y haber llegado hasta el tercer pase en los tres experimentos realizados, se sembró e incubó muestras de los últimos pases de cada uno de ellos. Así, se realizaron diferentes diluciones de los terceros pases de cada uno de los experimentos, a 10^{-7}, 10^{-9} y 10^{-11} M y sembrando también dos cantidades diferentes sobre el agar-agar contenido en las placas Petri. Se sembró con las cantidades de 5 µL y 10 µL, con el fin de determinar cuál de todos ellos era el que mejor permitía ver el crecimiento bacteriano para determinar el tipo de bacterias y realizar el conteo de las colonias que habían crecido en las placas Petri.

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos tras utilizar las diferentes diluciones y las diferentes cantidades de sembrado en la placa. Como se puede ver, el mejor resultado se obtuvo para la dilución más grande (10^{-11}) y el sembrado de 5 µL. Debido al gran crecimiento bacteriano que se produjo como consecuencia de los experimentos, para poder observar el tipo de bacterias y proceder al conteo de las colonias, la muestra analizada debía estar muy diluida.

Para realizar el conteo bacteriano se utilizó un contador de colonias digital marca P. Selecta, provisto de una lupa. Para cuantificar el número de colonias formadas, se utilizó un método para enumerar las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por mL de muestra.

Para la muestra resultante del experimento 1, se contaron 92 colonias, por lo que finamente el número de colonias totales sería de $1.84 \cdot 10^{15}$.

En la muestra del experimento 2 se contaron 72 colonias, por lo que el número de UFC fue de $1.44 \cdot 10^{15}$.

En el experimento 3 se contaron 64 colonias, por lo que finamente el número de colonias totales sería de $1.28 \cdot 10^{15}$.

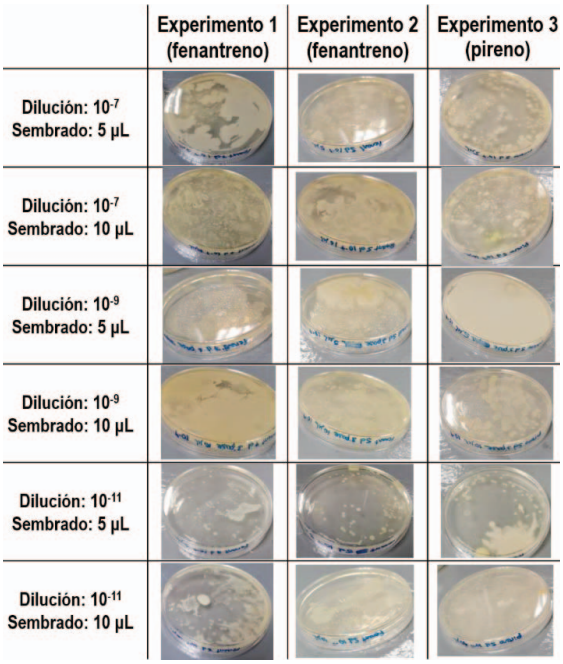


Figura 7. Resultados tras la incubación a diferentes diluciones y cantidades de sembrado en la placa Petri de los tres experimentos realizados.

IV. Conclusiones

Se evaluó el potencial de degradación microbiana de fenantreno y pireno en agua contaminada donde se determinó la afinidad y tolerancia que tienen estas bacterias al fenantreno y pireno. Sin embargo, las tendencias observadas indican un aumento de colonias en el caso del fenantreno y menos en el pireno. Esto responde a la formación de cada uno de esos hidrocarburos y a la cantidad de anillos de carbono que contienen, siendo más fáciles de romper en el fenantreno que en el pireno. Queda evidenciado, que el tiempo de climatización de las bacterias al hidrocarburo en el medio, agua residual, es un factor importante en la duplicidad de bacterias, así como también, la cantidad y/o concentración del hidrocarburo. Se puede evidenciar la posibilidad de trabajo colaborativo en consorcio entre bacterias Gram positivas y negativas utilizando como fuente de carbono estos hidrocarburos. Esto demuestra que en el agua residual existe el potencial que las bacterias puedan asimilar y/o adaptarse a estos contaminantes y poder utilizarlos como fuentes de carbono.

I. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa Propio de la Universidad Politécnica de Madrid por la ayuda de movilidad concedida a la Doctora Marta Ruiz-Santaquiteria para poder realizar la estancia en la Universidad Tecnológica de Panamá y realizar estas investigaciones.

Además, se agradece al laboratorio de Sanitaria por la oportunidad de poder realizar todas las experimentaciones en sus instalaciones.

II. REFERENCIAS

[1] A. Mojiri, J. L. Zhou, A. Ohashi, N. Ozaki, T. Kindaichi. "Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments", Science of the total environment., vol. 696, pp. 133971-133987, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133971.

[2] A. T. Lawal, "Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review. Cogent Environ. Sci". vol. 3, pp. 1339841-1339930, 2017. https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1339841.

[3] A. O. Adeniji, O. O. Okoh, A. I. Okoh, "Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons and their global trend of distribution in water and sediment: a review". In Book: Recent Insights in Petroleum Science and Engineering, edited Zoveidavianpoor. M., IntechOpen, UK. 2018. https://doi.org/10.5772/intechopen.71163.

[4] G. Vagge, L. Cutroneo, M. Castellano, G. Canepa, R. M. Bertolotto, M. Capello, "The effects of dredging and environmental conditions on concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water column", Mar. Pollut. Bull. vol. 135, pp. 704-713, 2018. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.006.

[5] M. Khairy, H. A. Ayoub, F. A. Rashwa, H. F. Abdel-Hafez, "Chemical modification of commercial kaolin for mitigation of organic pollutants in environment via adsorption and generation of inorganic pesticides", App. Clay Sci. vol 153, pp. 124-133. 2018. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.014.

[6] M.C.Vargas, N.E.Ramírez, S.M.Rueda, F.N.Sánchez. "Isolation of microorganisms with capability to degrade polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH´s)". Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol.1. pp 45-53.

[7] A.A. Grey, F. Mejía, V.M. Domínguez. "Aislamiento de bacterias degradadoras de hidrocarburos aromáticos en sedimentos de la Bahía de Manzanillo". IV Congreso de Ingeniería, Ciencias y Tecnología. Universidad Tecnológica de Panamá. 12-14 octubre 2011. Ciudad de Panamá.

[8] N., Silvia & G., M. & M., Maria. (2008). "Selection of bacteria with hydrocarbon degrading capacity isolated from colombian caribbean". Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR. 37. 61-75.

[9] G. Rangel, M. Esperanza et al. "Toxicokinetic and toxicodynamic symbiotic interactions among intestinal pseudomonas degrading of hydrocarbons with its wild host FISH Chirostoma jordani". *Rev. Int. Contam. Ambient* [online]. 2018, vol.34, n.4 [citado 2022-09-19]

[10] *S. Narváez-Flórez[1], M. L. Gómez[2] y M. M. Martínez.* "Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aisladas a partir de sedimentos del caribe colombiano ". *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), Cerro Punta Betín, Santa Marta, Colombia. snarvaez@invemar.org.co*

Nature as an Inspiration to Exploit Renewable Energy Sources: A Review on Trends and Biological Strategies

Orlando Aguilar Pinzón
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Dept. of Mechanical Engineering,Universidad Tecnológica de Panamá
orlando.aguilar1@utp.ac.pa

Miguel Chen Austin*
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Dept. of Mechanical Engineering,Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigación
miguel.chen@utp.ac.pa

Abstract— **Climate change is an undeniable problem that we, as humanity, currently face. There has been considerable effort from scientists all around the world who dedicate their efforts to studying this phenomenon, and to provide viable solutions, like renewable energy sources and the lowering of global energy consumption. With that in mind, biomimicry is a subject which is becoming more relevant in engineering and architectural applications each day. This includes energy generation as well. Biomimicry is defined as a practice that learns from, and mimics the strategies found in nature to solve human design challenges. It has been historically applied in an architectural sense, but the purpose of this article is to examine the recent trends in biomimicry research related to energy generation, and more specifically, renewable energy sources. Consideration of these trends demonstrates a consistent increase in interest from the scientific community to study and develop advancement in energy generating technologies, using biomimicry as a base. It also shows that, while there is considerable interest in biomimicry applied to energy generation, it is still in its early stages, and requires even more contribution from the global scientific community.**

Keywords—biomimicry, nature-based, bio-inspired, energy generation, bibliometric review

I. Introduction

In recent years, biomimicry has become more relevant in engineering and architecture, which has resulted in buildings that are curious regarding shape and structure. This is not a purely aesthetic matter however, biomimicry is also used to create smarter buildings, that tend to be more efficient, and sometimes, self-sufficient [1]. This last part is especially important, since we are currently facing two main issues related to energy consumption: the depletion of natural energy resources and the increase of diverse types of contamination, which in turn provoke global warming [2]. The Biomimicry Institute defines biomimicry as a practice that learns from and mimics the strategies found in nature to solve human design challenges [3]. Through millions of years of trial and error, nature has come up with very creative solutions to sustain life. It is through these solutions, patterns, and models that we can find answers to the problems that we, as humans, face [1].

In search of strategies, designers have adopted the knowledge of biological research. This knowledge influences human designs, instead of first determining the problems of human designs. This approach is called "solution-based biological-inspired design" [4] . The main concerns in this chosen type of biomimicry strategies are the scope of possibilities, the challenges of representing the biophysical knowledge and the difficulties found in the abstraction of the relevant principles [5].

There are several studies developed recently in the energy generation sector regarding biomimicry, therefore, the main objective of this paper is to serve as an extensive bibliometric review of the recent advancements made using biomimicry to different energy generation sectors. The energy generation sources considered for this review are solar, wind, hydraulic, wave, biomass, and natural gas.

This text will be divided in four main sections: Section I is an introduction to the subject matter, Section II presents the methodology used for the review, Section III contains the results of said review and finally, Section IV presents the conclusions.

II. Methodology

As previously stated, the main objective of this paper is to create an extensive bibliometric review about the state of art of regarding biomimicry implementation in diverse energy generation sources. The research papers used for this purpose span from the year 2015 to the current year, 2022. The search results came about through a mix of the usage of different keywords and Boolean operators on the search engine. The following steps detail the methodology used for the information search:

a. *Identifying keywords:* The first step is, naturally, to identify the keywords necessary to find the solicited information. The nature of this review required the use of "global" keywords that apply to the search as a whole, and then "specific" keywords that depend on the distinct energy sources established at the beginning of the review. With these parameters, the search phrases were similar for each energy source, with the difference being the specific keywords being switched out for each energy source; this produced a very methodological search process. There were additional terms added or taken from the

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00079

individual searches depending on situational necessity.

b. *Logical Operators:* The logical operators used in the search work as follows [6]:
   - **AND**: The AND operator is used to combine different terms and obtain only results in which all the used terms appear.
   - **OR**: The OR operator is used to combine different terms and obtain only results in which any of the used terms appear.
   - **NOT**: The – operator is used to eliminate certain terms, so that none of the results contain the used terms.
   - **" "**: The " " operator is used to limit results to only those in which the exact phrase inside the quotations appears.

   These logical operators in combination with the established keywords are the base of the information search for the review.

c. Bibliographic databases: A bibliographic database is "a database that contains descriptive records of books, periodical articles, conference proceedings, and audio-visual collections…or, as the term is more often used, an electronic index of journal or magazine articles." [7].
   For this review, several databases were used:
   - **ScienceDirect:** A bibliographic database owned by Elsevier, hosts over 18 million pieces of content from more than 4,000 academic journals and 30,000 e-books.
   - **SCOPUS:** A bibliographic databased owned by Elsevier, it covers more than 36,000 titles from approximately 11,000 publishers.
   - **MDPI:** It stands for Multidisciplinary Digital Publishing Institute and is a publisher of open access scientific journals. It is the largest open access publisher in the world, with over 390 diverse, peer-reviewed, open access journals.
   - **JSTOR:** This is a digital library which originally contained digitalized back issues of academic journals. It provides full-text searches of almost 2,000 journals.
   - **SpringerLink:** A databased owned by Springer Science + Business Media, which is a multinational publishing company of books, e-books and peer-reviewed journals in science, humanities, technical and medical publishing.

d. *Search Strategy*: Like stated before, the logical operators in combination with the established keywords are the whole base of the review, the process was as follows:

The three main keywords were "biomimicry," "bio-inspired," and "nature based." These terms were then followed by words describing the specific energy source being searched for, as an example:

"biomimicry" AND "solar energy"

This is what the initial search terms looked like for solar energy, however, in this specific case, the search results showed research which was heavily influenced in implementing biomimicry into architecture in a way that was not relevant for energy generation, so the terms were updated to:

"biomimicry" AND "solar energy" NOT architecture

The process was similar with the rest of the types of energy generation, and after the search was concluded, they were exported to **Mendeley Reference Manager**. The latter to assure there were no repeated results from all the searches using the merge function. A total of 615 articles were found. These articles were used to develop occurrence graphs in VOSviewer, version 1.6.18, commonly used for construction and visualizing bibliometric networks. This process will be explained in more detail in the "Results" section. Additionally, a smaller number of articles were chosen at random to showcase some of the biomimicry strategies used in these studies. The number of articles found and chosen for this purpose are shown in Table 1.

Table 1. Articles chosen for showcase, by year and country.

#	Author	Year	Country
1	Vanaga, R. and Blumberga, A.	2015	Latvia
2	Grippa, M.	2016	Spain
4	Martín-Palma, R. and Lakhtakia, A.	2017	United States (Pennsylvania)
5	Wright, Garret	2017	United States (New York)
6	Zhang, H. and Aggidis, G.A.	2018	United Kingdom
7	Mirniazmandan, S. and Rahimianzarif, E.	2018	Iran
8	Shrestha, Shweta	2019	United States (South Carolina)
9	Wayne, Bram et al.	2019	Indonesia
10	Qiao, Weibiao et al.	2020	Vietnam
11	Herzallh, Nidaa et al.	2020	Israel
13	Ozbayram, Emine et al.	2020	Türkiye
15	Prathik, Vemuluri et al.	2021	India
16	Stevovic, Ivan et al.	2021	Serbia
17	Ghandi, Smiti and Liu, Andrew	2021	United States (Texas)
18	AbdelGawad, Ahmed et al.	2021	Egypt
19	Volkov, A. V. et al.	2021	Russia
21	Willis, Max et al.	2021	Portugal
22	Zhang, Hiu et al.	2022	United Kingdom

23	Lackner, Maximilian	2022	Austria
20	Xiaoyan, Ma et al.	2022	China

III. Results Analysis and Discussion

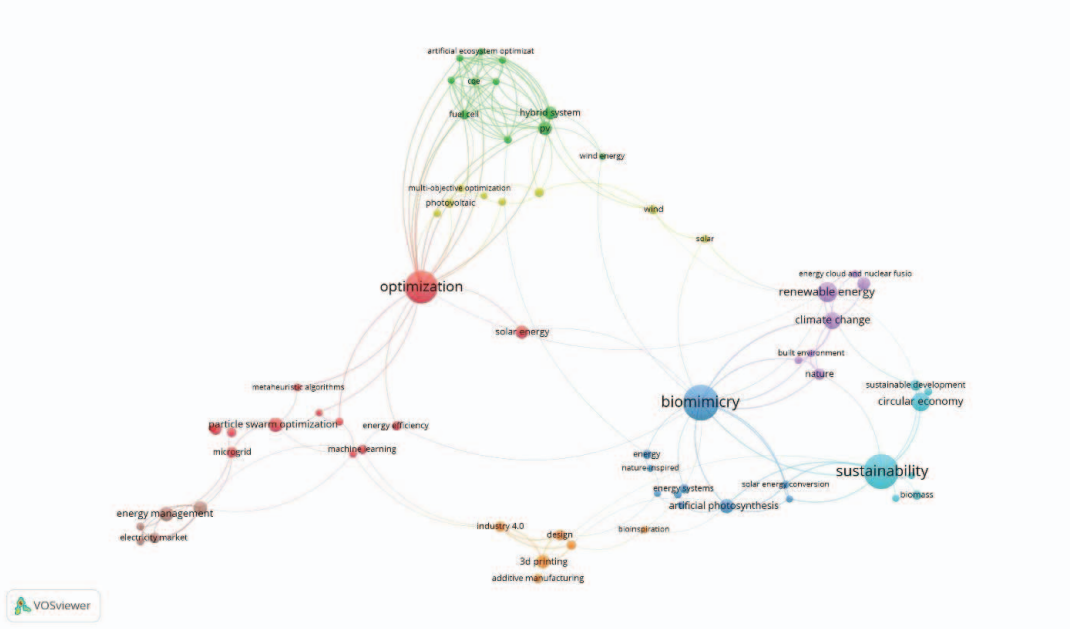


Figure 1: Full network map created from the articles used for the review.

As stated in the previous section, a total of 615 articles were chosen for this review. Processed articles in VOSviewer helped create terms-related networks. These networks can be constructed based on citation, bibliographic coupling, co-citation, or co-authorship relations. The networks can also be built using the text-mining functionality to visualize co-occurrent terms (i.e., keywords) which is what this review is focusing on.

a) Current and future knowledge trends

The settings specified for the following network map are a minimum of 5 occurrences of a keyword, which means only 79 out of the 1,676 keywords pulled out from all the documents were used for the map. Additionally, only 67 of these items were fully connected to each other. These settings created the following map, shown as Figure 1.

There are a total of 8 clusters formed within the map. The size of each circle being an indication of how relevant each word is to the network. This means that the three main clusters are the ones which formed around the words “optimization” (red), “biomimicry” (blue), and “sustainability” (cyan). This does indicate that biomimicry is used towards sustainability and optimization of protocol systems. The terms “renewable energy” and “climate change” are algo very relevant, the former being connected to all three main clusters.

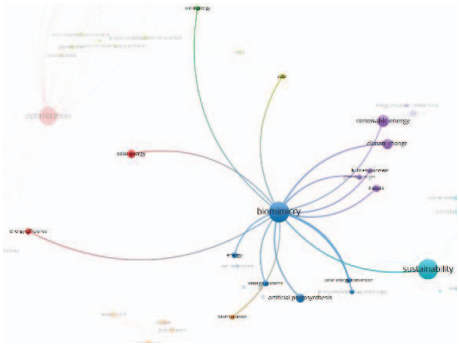


Figure 2: Closeup of the "biomimicry" cluster.

As can be observed from Figure 2, the literature shows that biomimicry is heavily tied to renewable energy systems, especially solar and wind energy, with artificial photosynthesis being very relevant in this regard.

Figure 3: Closeup of the "optimization" cluster.

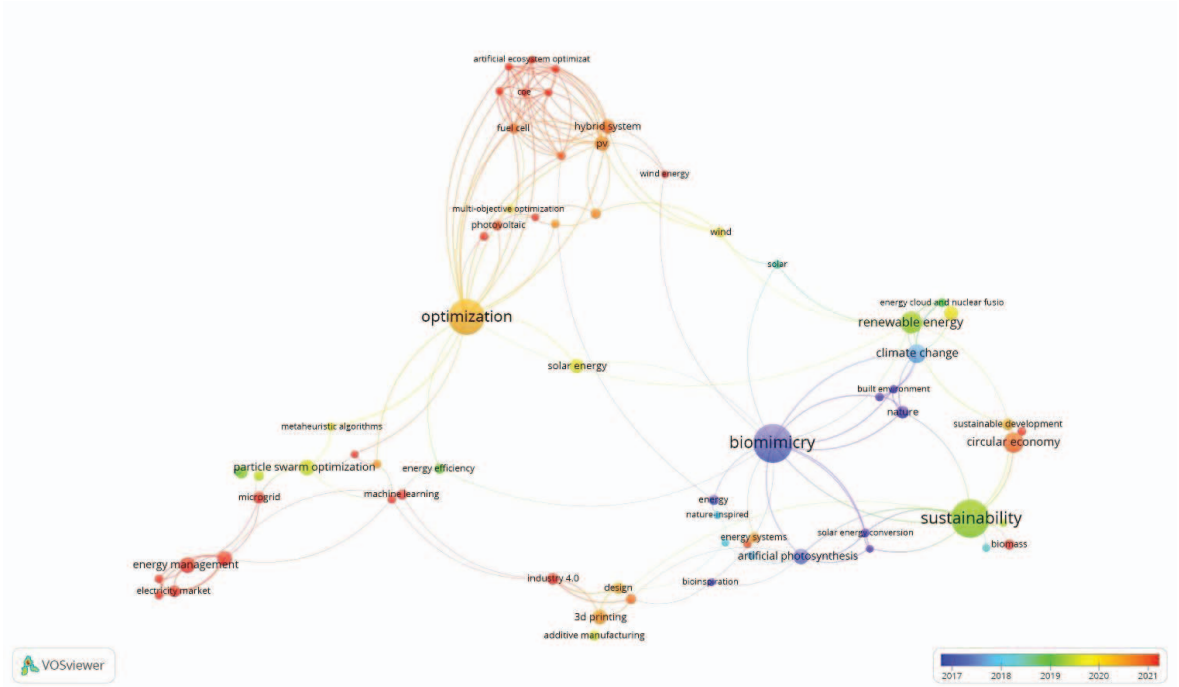


Figure 4: Overlay visualization of the VOSviewer map.

From Figure 3, which is a closeup of the "optimization" cluster, we can see that optimization when referring to biomimicry is influenced by hybrid renewable energy systems and algorithm optimization. The latter of which is tied directly with terms like machine learning, particle swarm optimization, and energy management.

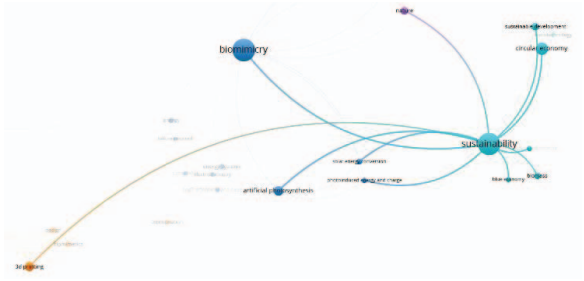


Figure 5: Closeup of the "sustainability" cluster.

The final closeup, Figure 4, shows the "sustainability" cluster. This one is tied to circular economy, sustainable development, and to various items related to solar energy. The next figure will show the same map as in Figure 1, but with a different emphasis, this one will be an overlay visualization:

The purpose of the overlay visualization is to show the way that the literature has behaved throughout the years. The years 2015 and 2016 were removed from the bottom due to there not being enough articles in those two years to influence the map, and the year 2022 was removed from the top since that is the current year, and including it makes visualizing the rest of the years more difficult. This means that 2017 is at the left side of the scale with a blue color, and 2021 is at the right side, in red.

The term biomimicry is down towards the blue side, meaning that it was more relevant towards the years 2017 and 2018 than they are now. In the yellow and red side (2020-2021) optimization, machine learning, artificial ecosystems, and energy management. In red there are also some terms regarding renewable energies, specifically photovoltaic, wind energy, and hybrid systems.

This could be interpreted to mean that biomimicry, speaking from an energy generation point of view, has been moving towards a few specific points, namely optimization of energy management through inspiration from ecosystems and machine learning, as well as new developments in wind energy and solar energy from nature inspired ideas. It is important to note that both wind energy and solar energy are also present towards the 2017 side, meaning that these two renewable energies have been a focus point of biomimicry since it has been used to develop ideas in the energy generating sector.

b) Evidence of nature inspiration to profit from renewable energy sources

Table 2 presents the comparison of the randomly selected articles, the points of focus will be energy source, biological analogies, climate type, and whether the research was experimental, simulated, or both. A total of 20 articles were chosen and ordered in descendent? way by released year , in the same way as the list presented in Table 1.

Table 2. Summary of review results.

Reference#	Year	Energy Source	Biological analogy	Climate type	Type of research
8	2015	Solar	Shape – brittle stars	Temperate oceanic	Pre-research
21	2016	Hydroelectric	Shape – Snail shell	Temperate maritime	Simulation
11	2017	Solar	Shape – Insect compound eyes	Humid continental	Simulation
9	2017	Wind	Shape – Owl feathers and Humpback whale fins	Humid subtropical	Experimental
14	2018	Wave	Shape – Kelp Process – Human heart Shape – Centipede Shape – dragon-like wings Process – Oyster Ecosystem – Ant colony Shape and process – Sea snakes Shape and process – Anaconda	–	Review
12	2018	Wind	Shape – Dragonfly wings Shape – Sea sponge towers Shape – DNA helix	–	Review
20	2019	Wind	Shape – Palm tree roots	Humid and subtropical	Simulation
18	2019	Wind	Shape – Bird feathers	Tropical	Simulation
22	2020	Natural gas	Process – Algorithms based on swarms from different organisms	–	Simulation
17	2020	Solar	Process – Artificial photosynthesis	Mediterranean	Experimental
13	2020	Biomass	Process – Animal gut microbiota	Mediterranean	Theoretical
26	2021	Wind	Shape – Dragonfly vein structure Shape – Golden eagle feather structure	Tropical	Simulation
25	2021	Solar	Process – Evolutionary multiobjective genetic algorithm	Continental	Simulation
19	2021	Solar	Process – Biofluorescent bacteria	Continental steppe	Experimental
16	2021	Wind	Shape – Lotus	Desert	Simulation and experimental
15	2021	Hydroelectric	Shape – Humpback whale pectoral fins	Temperate	Simulation
10	2021	Wave	Shape – Arrow crabs	Mediterranean	Simulation
24	2022	Wave	Shape – Big-eared octopus	Temperate	Simulation and experimental
23	2022	Natural gas	Process – Methanotrophic bacteria	Continental	Experimental
27	2022	Optimization	Process – Bird swarm algorithm	Humid continental	Simulation

It is interesting to note that within this random selection there were several repeated biological analogies. Namely the wing shape from dragonflies, humpback whale fins, and bird feather structures. The main characteristic of Dragonflies used for the studies found here are their wings, which have been shown to have a special microstructure which helps with a more efficient flight, and a shape that facilitates rapid acceleration [28]. For humpback whales it is similar, but the working fluid is water instead of air. Even though these flippers have non-smooth leading edges, they demonstrate superior fluid dynamics to the characteristically smooth-leading edges of human-made wings, turbines, and blades. Even though these whales are massive, being between 13-16 meters long, they can swim in circles tight enough to create bubble nets just 1.5 meters across. Bird feathers are more varied. For example, the wingtip feathers on certain raptor species like vultures and eagles increase aerodynamic efficiency, to be able to fly for longer without consuming high amounts of energy, or like owl feathers which cushion the wind and help them achieve a near silent flight. The shaft of bird feathers also protects them from being damaged by high winds, since they have non-circular cross sections which relieves the tension created by the wind.

Moving on to the types of energy generation, it is important to note that there was one result from optimization which, while not strictly related to energy generation, is one of the hot points in recent years where biomimicry is headed (Figure 3), so it is important to note. As far as wind energy is related, all but one of the selections is related to turbine blade shape, and these articles are from 2017 to 2021, therefore it can be assumed that it is still a relevant topic of research.

Solar energy is somewhat more varied, with some research papers focusing on nature-based algorithms to optimize generation, while some focus more on the traditional aspect of improving the efficiency of the photovoltaic panels. Wave energy is another topic of interest, as shown by one of the articles from 2017, which serves as a review of eight different animal-inspired wave energy converter designs. A 2022 article from this same selection is a paper showing results from the research, which was started with the 2017 article, ending with a promising wave energy converter design inspired by the shape of a species of octopus. One last thing to note is that few experimental studies were encountered, this may be influenced by availability of funds to conduct experimental analysis of designs inspired by biomimicry.

All of this does bring forth interesting topics for new research. There is merit in modifying existing technology with nature-inspired solutions such as the ones shown in the showcase, especially since most of these show very positive results regarding the efficiency of the generation systems. However, the maps created using VOSviewer show definite tendencies towards the Industry 4.0 side of things, especially regarding machine learning, energy management and artificial system optimization. This isn't surprising given how this is the general direction that the technology that we create is heading towards, and biomimicry research could benefit from it.

IV. Conclusions

Following the results obtained from this bibliometric review, several conclusions arise:

1. After creating a bibliometric review about biomimicry developments in energy generation, it was found that most of the studies have been developed in the recent years. Starting from 2015, which is the earliest year taken into consideration for this review, the VOSviewer overlay map clearly shows a significant growth of interest in developing new technologies based on a biomimetic approach.
2. Biomimicry research is being developed worldwide, studies were found from all around the globe, however, it is more prominent in Asia, North America, and Europe. Not specifically in that order.
3. Latin American research is scarce in this area, indicating a need for a higher scientific contribution in biomimicry from this area of the world.
4. Biomimicry in energy generation is in exploratory phases, something that can be inferred from the fact that there is an extremely varied array of possibilities being explored by researchers around the world. There is no correct answer that has been found, but several which need to be developed further.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Department of Mechanical Engineering within the Universidad Tecnológica de Panamá for their collaboration, together with the Research Group ECEB (https://eceb.utp.ac.pa/), as well as SENACYT.

REFERENCES

[1] R. M. A. El-Zeiny, "Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 50, pp. 502–512, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.08.054.

[2] N. Chayaamor-Heil and N. Hannachi-Belkadi, "Towards a platform of investigative tools for biomimicry as a new approach for energy-efficient building design," *Buildings*, vol. 7, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.3390/buildings7010019.

[3] The Biomimicry Institute, "What is Biomimicry?" Jan. 14, 2015. https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/ (accessed Jul. 11, 2022).

[4] J. Knippers and T. Speck, "Design and construction principles in nature and architecture," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 7, no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1088/1748-3182/7/1/015002.

[5] L. Badarnah and U. Kadri, "A methodology for the generation of biomimetic design concepts," *Architectural Science Review*, vol. 58, no. 2, pp. 120–133, Apr. 2015, doi: 10.1080/00038628.2014.922458.

[6] Southern Adventist University, "Google & Google Scholar: Boolean Operators," Feb. 02, 2022. https://southern.libguides.com/google/boolean (accessed Jul. 12, 2022).

[7] New World Encyclopedia, "Bibliographic Database," Dec. 31, 2010. https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Bibliographic_database (accessed Jul. 12, 2022).

[8] R. Vanaga and A. Blumberga, "First Steps to Develop Biomimicry Ideas," in *Energy Procedia*, Jun. 2015, vol. 72, pp. 307–309. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.044.

[9] G. Wright, "Bio-Inspired Wind Turbine Blade Profile Design," 2017.

[10] M. Willis, G. Adamo, J. Hanna, and J. Auger, "Towards Sustainable Island Futures: Design for Ocean Wave Energy," *Journal of Futures Studies*, vol. 25, no. 4, pp. 31–44, 2021, doi: 10.6531/JFS.202106_25(4).0003.

[11] R. J. Martín-Palma and A. Lakhtakia, "Progress on bioinspired, biomimetic, and bioreplication routes to harvest solar energy," *Applied Physics Reviews*, vol. 4, no. 2. American Institute of Physics Inc., Jun. 01, 2017. doi: 10.1063/1.4981792.

[12] S. Mirniazmandan and E. Rahimianzarif, "Biomimicry, An Approach Toward Sustainability of High-Rise Buildings," *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, vol. 42, no. 4, pp. 1837–1846, Dec. 2018, doi: 10.1007/s40995-017-0397-4.

[13] E. G. Ozbayram, S. Kleinsteuber, and M. Nikolausz, "Biotechnological utilization of animal gut microbiota for valorization of lignocellulosic biomass," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 104, no. 2. Springer, pp. 489–508, Jan. 01, 2020. doi: 10.1007/s00253-019-10239-w.

[14] H. Zhang and G. A. Aggidis, "Nature rules hidden in the biomimetic wave energy converters," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97. Elsevier Ltd, pp. 28–37, Dec. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.08.018.

[15] A. v. Volkov *et al.*, "Application of New Approaches to the Hydropower Combined Complex Creation for Autonomous Energy Supply," *E3S Web of Conferences*, vol. 320, p. 04002, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132004002.

[16] I. A. Abdelrahman, M. Y. Mahmoud, M. M. Abdellfattah, Z. H. Metwaly, and A. F. AbdelGawad, "Computational and Experimental Investigation of Lotus-inspired Horizontal-Axis Wind Turbine Blade," 2021.

[17] N. S. Herzallh *et al.*, "Photosynthesis Z-Scheme biomimicry: Photosystem I/BiVO4 photo-bioelectrochemical cell for donor-free bias-free electrical power generation," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 168, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.bios.2020.112517.

[18] B. M. Wayne, D. Santoso Mintorogo, and L. S. Arifin, "Biomimicry Kinetic Facade as Renewable Energy," 2019. [Online]. Available: https://www.pinterest.com/cheichang/diagram/

[19] S. Gandhi and A. Liu, "Living Energy," vol. 2021, no. 24, pp. 1–17, 2021, doi: 10.2307/27040252.

[20] S. Shrestha, "Design and Optimization of Hybrid Foundation for Tall Wind Turbines and Development of New Foundation Through Biomimicry," 2019. [Online]. Available: https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations

[21] M. Grippa, "CFD analyses and performance comparison of micro-hydropower plants," 2016.

[22] W. Qiao, H. Moayedi, and L. K. Foong, "Nature-inspired hybrid techniques of IWO, DA, ES, GA, and ICA, validated through a k-fold validation process predicting monthly natural gas consumption," *Energy and Buildings*, vol. 217, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110023.

[23] M. Lackner, D. Drew, V. Bychkova, and I. Mustakhimov, "Value-Added Products from Natural Gas Using Fermentation Processes: Products from Natural Gas Using Fermentation Processes, Part 2," 2022. [Online]. Available: www.intechopen.com

[24] H. Zhang, W. Sheng, Z. Zha, and G. Aggidis, "A Preliminary Study on Identifying Biomimetic Entities for Generating Novel Wave Energy Converters," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15072485.

[25] I. Stevovic, D. Mirjanic, and N. Petrovic, "Integration of solar energy by nature-inspired optimization in the context of circular economy," *Energy*, vol. 235, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121297.

[26] V. Prathik, U. K. Narayanan, and P. Kumar, "Design Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Blade Using Biomimicry," 2021.

[27] M. Xiaoyan, Y. Mu, Y. Zhang *et al.,* "Multi-objective microgrid optimal dispatching based on improved bird swarm algorithm," *Global Energy Interconnection*, vol. 5, no. 2, 2022, doi: 10.1016/j.gloei.2022.04.013

[28] AskNature, "Biological Strategies" Oct. 18, 2016. https://asknature.org/biological-strategies/ (accessed Jul. 27, 2022).

Permeable reactive barriers for *in situ* remediation of nitrate-contaminated groundwater: A review

Graciela Cecilia Sánchez Hidalgo
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
graciela.sanchez@utp.ac.pa

Euclides Deago
Center for Hydraulic and Hydrotechnical Research (CIHH)
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
euclides.deago@utp.ac.pa

Maria De Los Ángeles Ortega Del Rosario
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
maria.ortega@utp.ac.pa

***Abstract* — Groundwater contamination by nitrate has become a global issue, mainly caused by the excessive use of fertilizers. Thus, several technologies, such as permeable reactive barriers (PRBs), have become appropriate, efficient, and sustainable in-situ technology for treating contaminated groundwater. Biological denitrification is the main mechanism for nitrate removal in groundwater. Therefore, temperature, pH, denitrifying bacteria, reactive material, and PRB design are critical factors for nitrate remediation in groundwater. Recently, agricultural residues have been proposed as novel reactive materials since they can be a source of organic carbon for the biostimulation of this process due to their cost, accessibility, and removal efficiency. In addition, PRBs behavior can be predicted by modeling and simulation before the in situ application. This review article analyzed the studies published during the past five years (2018-2022). It was found that 37.73% of the studies were laboratory-scale, employing leaching, batch, and column tests. However, 13.21% of the articles pertained to in situ PRB studies for nitrate remediation in groundwater. Therefore, work on the long-term performance of PRBs for nitrate removal and their in-situ performance is scarce.**

***Keywords* — heterotrophic denitrification, permeable reactive barrier, solid substrate organic, groundwater contamination, model**

I. Introduction

Groundwater is the world's main source of fresh water for life [1], [2]. It is estimated that 50% is used for domestic and 40% for crop irrigation [3]. However, water stress, climate change, population growth, and conventional agricultural activities compromise its availability and quality [4].

Groundwater contamination is a global issue [5], [6]. Nitrate (NO_3^-), is considered the most widespread anthropogenic contaminant in groundwater worldwide [3]. Septic tanks, sewage, industrial water, and landfills are critical sources of pollution. However, the agricultural sector is considered the most significant nitrate contributor worldwide [1], [5], [7], [8] due to the excessive use of fertilizers and nitrogenous chemicals that leach into the surface soil and groundwater in the form of (NO_3^-), nitrite (NO_2^-) and ammonium (NH_4^+) [9]. Only 30 to 40% of the nitrogen contained in the fertilizer is used, while approximately 12.5 to 45% of the nitrogen leaches into groundwater [10]. In water, NO_3^- is the most stable and mobile form of nitrogen species, so it tends to accumulate in aquifers[8], [11]–[13] .

Irrigation with NO_3^- contaminated groundwater can also contribute to the contamination of the soil and crops [12], eutrophication [14], and other bodies of fresh water and the marine environment increasing coral bleaching and mortality [15]. This causes irreversible damage to the ecosystem, food security, and health, such as cancer, methemoglobinemia, and thyroid diseases [16]. Therefore, the World Health Organization (WHO) and the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) have established quality standards for drinking and irrigation water with a concentration of NO_3^- limit of 50 mg/ L and 22 mg/L, respectively [17], [18].

Permeable reactive barriers (PRBs) are a widely used technology for in situ groundwater treatment, introduced as an alternative method to conventional systems such as pump-and-treat systems [16], [19]. The PRB intercepts the groundwater or subsurface water flow contaminated by either a punctual or a diffuse source. The reactive materials interact with the contaminant, reducing the latter to a less harmful form at the site. Therefore, after the water passes through the PRB, this water has a reduced contaminant concentration [20]. The environmental conditions and the reactive materials in the PRB will determine the nitrate remediation mechanism [21], [22]. In addition, this technology achieves treatment in groundwater without further energy use since the water moves in a natural gradient, with low maintenance costs and a good lifespan [23].

Nitrate treatment mechanisms in PRB can be a chemical reduction or biological denitrification [16]. Chemical reduction occurs when zero-valent iron (ZVI), the most commonly used reactive material in PRB for removing contaminants in groundwater, is used as a reactive material [19]. However, in this reaction, NO_3^- is reduced mainly to NH_4^+. In contrast, biological denitrification is a bioremediation process that uses a carbon source as an electron donor for biostimulation of microbial activity, where NO_3^- is reduced to nitrogen (N_2) [19], [24].

Biological denitrification can be autotrophic when bacteria use an inorganic carbon source as an electron donor, e.g., carbon dioxide and bicarbonate, and reduced iron or sulfur [5]. In comparison, heterotrophic denitrification occurs when bacteria use an organic carbon source as electron donors [5], [25], [26]. Heterotrophic denitrification shows a higher denitrification rate than autotrophic denitrification [27]. Moreover, due to their high efficiency, PRBs based on heterotrophic denitrification have been chiefly applied for the remediation of nitrate-contaminated groundwater [28]. Therefore, it has been put forward as a strategy for NO_3^- removal and mitigation in groundwater [24].

Reactive materials, such as solid sources of organic carbon from agricultural and forestry residues, have been studied for nitrate removal because they stimulate biological denitrification and are affordable and accessible [29], [30]. For instance, in the study developed by [31] it was shown by a batch test that *Saccharum spontaneum L.* (*S. spontaneum)*, which is considered an invasive weed, obtained a nitrate removal rate of 327 mg/L of $N\text{-}NO_3^-$. Similarly, in another study [32], *Typha angustifolia L.* (*T. Angustifolia*), a native

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00080

grass of marshes, swamps, and wetlands, obtained a removal rate of 50 - 45.25 mg/L of N-NO_3^-.

In Panama, groundwater quality monitoring is currently not up to date [33]. Rural populations where community systems are used for water consumption and inadequate sanitation systems show a greater vulnerability to the ingestion of this contaminant [34].

Therefore, the general objective of this work is to investigate the state of the art of PRB for the remediation of nitrate-contaminated groundwater by using a solid organic substrate as a carbon source and to identify the main mechanisms of pollutant removal, the biomasses frequently used, the environmental conditions and general characteristics of the studies performed in-situ. This scope is aligned with the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs), mainly SDG 6, clean water and sanitation, and SDG 12, responsible production and consumption [35].[35]

II. METODOLOGY

The critical review of state of the art was performed using the Web of Science database in the search field "subject" which includes (Title, abstract, keywords, author keywords). The search was limited to articles published in peer-reviewed journals in the last five years (2018 to 2022).

The search criteria used were a combination of the following keywords, where the AND operator was used ("permeable reactive barrier*",groundwater, nitrate, n=65), ("permeable reactive barrier*", groundwater, nitrate, denitrification, n=36), (nitrate, denitrification , "carbon source*" solid carbon, n=131), (nitrate, denitrification "carbon source*" organic substrate, n=36), ("permeable reactive barrier*", numerical modelling , numerical, model, n=17), ("permeable reactive barrier*", optimization, groundwater, n=17). Consequently, a total of 305 articles were obtained.

The title and abstract were read, allowing the exclusion of duplicated articles and articles not relevant to the search objectives. The inclusion criteria comprised articles with PRB for remediation of nitrate-contaminated groundwater, reactive materials from agricultural residues, and studies on natural organic solid substrates and PRB modeling for groundwater remediation.

The inclusion-exclusion criteria led to 54 articles, of which 22.64% were review articles and 37.73% were laboratory-scale studies, which included the analysis of different materials as carbon sources for denitrification and PRB. Moreover, 13.21 % of articles found in the literature were PRB in situ studies for nitrate remediation in groundwater, while 26.41 % of articles were about numerical modeling and simulation considering criteria related to the removal efficiency and optimal sizing of PRB (Fig.1).

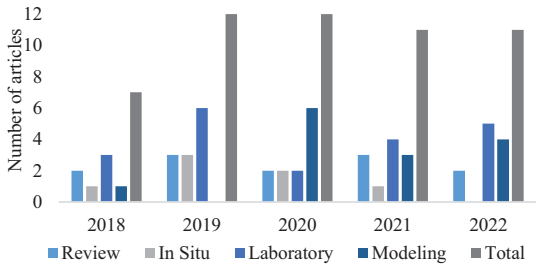


Fig. 1. Number and type of articles per year since 2018.

III. BIOLOGICAL DENITRIFICATION

Denitrification is the most important natural process for nitrate NO_3^- removal in groundwater [25], [36]. By denitrifying microorganisms and under anaerobic conditions, NO_3^- is reduced to N_2 and returns to the atmosphere as a gas (1) [27].

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (1)$$

In this sequential transformation process, some necessary enzymes must be present. Here, NO_3^- is converted to nitrite (NO_2^-) by the enzyme reductase (nar). Then, this NO_2^- is converted to nitric oxide (NO) by the enzyme nitrite reductase (nir). The latter is then converted into nitrous oxide (N_2O) due to the action of the enzyme nitric oxide reductase (nor) and finally into harmless nitrogen gas (N_2) by the enzyme nitrous oxide reductase (nos) [25]. Denitrifying bacteria cannot degrade the complex polymeric carbon found in organic substrates; thus, they rely on an array of microorganisms to release simpler organic compounds, which contribute to denitrification [37]. The metabolic activities of the microorganisms and the structure of the associated microbial communities (biofilm) are directly related to the source of organic carbon acting in this process [37], [38].

Organic carbon sources can be in liquid, solid, or gaseous states, such as ethanol, methanol, acetic acid, acetone, sugar, glucose, vegetable oils, methane, and organic pollutants [28]. However, as electron donors, carbon sources from solid organic substrates have been presented as reactive material of interest because they support denitrifying bacteria [39]. A study indicated that, under the same conditions, with an initial NO_3^- concentration of 40 mg/L, the rice husk system obtained a higher removal efficiency (97.58%) than the methane system (93.46%) [40]. Among the solid organic substrates tested for nitrate removal in groundwater, it can be found wood chips, sawdust, wheat straw, corn cobs, mulch, compost, green waste, wheat straw, corn straw, peat, cotton, cardboard, and newspapers [21], [25], [26], [41].

The solid organic carbon substrate uses biodegradable polymers as carbon sources and biofilm carriers; these polymers can be first hydrolyzed to dissolved organic carbon (DOC) by bacterial and fungal enzymes. Some denitrifying bacteria can directly utilize the solid carbon source [27], [42]. Organic solid substrates could release important carbon sources to promote the metabolism and growth of bacteria and enhance biological denitrification [43]. Equation (2) describes heterotrophic denitrification, where CH_2O represents a generic organic compound [29].

$$5CH_2O + 4NO_3^- \rightarrow 2N_2 + 5HCO_3^- + 2H_2O + H^- \quad (2)$$

On the other hand, dissimulative reduction of NO_3^- to NH_4^+ (DNRA) occurs when nitrate relative to organic carbon is limited so that NO_3^- can be transformed to NH_4^+ [5]. Therefore, in subsurface environments, the lack of organic carbon represents a limiting factor for denitrification [25], [44]. Indicators of this mechanism are the concentrations of NO_2^- and NH_4^+ in the PRB effluent. If these concentrations are insignificant, nitrate removal was mainly performed through denitrification and not by other processes such as DNRA [37]. In addition, incomplete denitrification can generate a greenhouse gas, N_2O [44].

A. Environmental conditions for denitrification

Anoxic conditions favor denitrification, allowing denitrifying bacteria activity and biofilm formation. Therefore, parameters such as temperature, pH, and dissolved oxygen are essential for this process [26]. Gibert et al. [37] identified that NO_3^- removal increased at greater PRB depth due to lower oxygen content. In addition, it has been reported that in the conditions for favorable denitrification, the temperature is between 25 °C to 35 °C [25]. However, Liu et al. [29] indicated that denitrification could occur outside this temperature range since, at 16°C, they obtained a nitrate removal of 99.8% using corn cob as reactive material.

In anoxic conditions, denitrifying microorganisms are favored with a neutral pH (5.5 to 8), improving their growth and metabolism [37]. In the case of [26] straw as a carbon source provided a favorable environment for denitrification, with a pH of 7.38-7.85; while in the case of [45] hazelnut shells provided a pH between 6.7 to 6.3, and in tea waste, a pH between 5 and 6.4.

Denitrifying bacteria can significantly differ in phylum, class, family, order, and many types of mutually dominant genera [20]. This coincides with the findings obtained by [26]. Both studies used improved agricultural residues of sustainable release carbon composite material (SCCM), such as wheat straw, wood chips, corn straw, and corn cob. Besides, the main bacterial families found in the carbon sources were *Cellulosimicrobium, Pseudomonadaceae, Neisseriaceae, Rhodospirillaceae, Cytophagaceae, Spirillaceaee, Rhizobiaceae, and Arthrobacter* [20], [26].

IV. Reactive Material

A. Characteristics of reactive materials based on the solid organic substrate

The reactive material is one of the most critical aspects of implementing PRBs [5] since it is distributed in the PRB. Nitrate removal occurs when the contaminated groundwater flow passes through this porous material, and then the contaminant is reduced to a less harmful form by denitrifying microorganisms [29]. For their selection, the type of contaminants and their concentration in the aquifer, the treatment mechanisms, the hydrological and geological conditions of the aquifer, the environmental conditions, accessibility, availability, and cost of reactive materials should be considered [37], [44], [46].

The hydraulic conductivity of the reactive materials that make up the PRB (k_{PRB}), must be greater than the aquifer hydraulic conductivity (k_a), ($k_{PRB} \geq k_a$) to maximize remediation efficiency by allowing contaminated groundwater to flow through the PRB under a natural hydraulic gradient [13], [26], [37], [47] Substrate size is an essential factor as well. One study reported that the highest nitrate removal efficiency (99.99 ± 0.01 %) of banana peel as a solid organic carbon source was associated with larger particle sizes (2.36 to 4.75 mm) and was attributed to higher organic matter release compared to smaller ones (< 0.25 mm), where a removal efficiency of (86.05 ± 0.40 %) was obtained [48]. On the other hand, lower molecular weight substrates are more suitable for the growth and activity of denitrifying bacteria due to the bioavailability of carbon [25].

Solid organic carbon sources from agricultural residues mainly comprise cellulose (35 to 55 %) and hemicellulose (5 to 25 %), both easily degradable by microorganisms. On the contrary, lignin (15 to 40%) is the most difficult to degrade, limiting the activity of denitrifying bacteria [27]. However, enzymes can hydrolyze cellulose and hemicellulose into small-molecule and soluble substrates, which microbes can utilize during denitrification [49]. The rapidity of this enzymatic hydrolysis process results in the high initial release of carbon sources. However, the right amount of lignin can support this carbon release, allowing long-term efficiency [27].

The supply capacity and lifespan of carbon sources are related to the content of biodegradable components [49]. One study indicated that the higher denitrification efficiency of corn cob (99.11%), compared to sawdust and Okra straw with removal efficiencies of (96.27% and 97.89%, respectively), is due to higher cellulose and hemicellulose content and lower lignin content [29]. This coincides with [11], where the authors indicated that the lower the lignin content in the organic substrate, the higher the degradation and ability to develop bacterial activity, where rice husk with the lowest lignin content (22.22%), compared to rice straw (30.71%), corn cob (36.23%), cotton (58.43%) and coconut husk (87.10%), produced the highest nitrate removal rate. In addition, the organic substrate must ensure a slow and sustained carbon release to avoid groundwater contamination by excessive carbon release [44].

Qi et al. [43] suggested the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of materials as a limiting factor for denitrification, as it indicates the carbon source needed for denitrification. These can cause a faster denitrification reaction and domestication of denitrifying bacteria growth. On the other hand, [50] reported a correlation between nitrate removal and the chemical oxygen demand (COD) released from each carbon source.

B. Denitrification capacity using solid organic substrates based on agricultural and forestry residues:

Ling et al. [49] studied carbon release and nitrate removal from rice straw, wheat straw, corn stover, corn cob, corn cob, soybean stalk, and soybean hull as carbon sources. It was identified that corn cob obtained better stability and removal performance of nitrate and total inorganic nitrogen and lower risk of secondary pollution due to less accumulation of nitrite, ammonium, and COD in the effluent. A similar study obtained nitrate removal efficiency of sorghum stalk, wheat husk, vegetable sponge, banana stalk, watermelon skin, and sweet potato stalk of 96.94 ± 0.35, 96.52 ± 0.53, 96.23 ± 0.45, 95.72 ± 0.16, 94.20 ± 0.56 and 92.76 ± 1.10 %, respectively. The vegetable sponge obtained lower risks of excessive carbon release and secondary contamination. In addition, it obtained a moderate degree of hydrolysis and an increase in its roughness, which favors the adhesion of microorganisms. Therefore, it was suggested as the most suitable solid carbon source for denitrification [51].

Chen et al. [50] evaluated the carbon release of the peanut shell, sawdust, peat, and mixtures of these, where they obtained that the peanut shell presented a high carbon release capacity, followed by mixtures of the residues, sawdust, and peat, respectively. The peanut shell obtained the highest nitrate removal efficiency (97%) at 48 h, while the mixture of residues obtained 90% at 120 h. Yu et al. [52] studied the nitrogen removal efficiency of corn cob as a source of organic carbon, where they obtained an average removal efficiency of TN (70.55%), concluding that corn cob improved the

biodegradability of the polluted river water and accelerated the catalytic biochemical reactions, which could provide a carbon source for the sustainability of denitrifying bacteria.

C. *Solid-phase organic carbon sources as reactive materials in PRB:*

Reactive materials should be evaluated in the laboratory before field application to determine their properties and contaminant removal efficiency as reactive materials. The most common tests reported in the literature are leaching, batch, and column experiments. Leaching experiments determine the leachable forms of total inorganic nitrogen (TIN) from reactive materials such as nitrate, nitrite, ammonium, and organic carbon (COD). In contrast, Batch experiments determine the ability of the reactive materials to provide dissolved organic carbon for denitrifying bacteria activity and pollutant removal efficiency [45], [53]. Column experiments indicate aspects of water flow, such as velocity, hydraulic retention time or residence time (HRT), and the conditions to evaluate long-term denitrification by simulating a permeable reactive barrier [19].

The study [45] determined that it might not be suitable for groundwater remediation due to the high release of ammonium and COD from tea waste. In the case of the study presented by [53], peanut shells, walnuts, almonds, and luffa presented a release of organic and nitrogenous components at adequate levels and with the capacity to remove nitrate without secondary contamination.

In another study, it was reported that high initial nitrate concentration resulted in decreased removal efficiency; olive nut showed a removal efficiency of 99% for the lowest initial nitrate concentrations, while for the highest concentration, removal efficiency of 76% was obtained [44]. Corn cob, straw, and green waste presented higher removal efficiencies than wood products, such as wood chips [54]. This coincides with the results obtained by [26] where wheat straw, corn cob, and corn straw showed higher total carbon release than wood chips. The more labile substrates promote high denitrification efficiencies in the initial stages of the PRB process. However, they may have limited carbon release at a later stage. Therefore, they may have lower longevity than less degradable materials [25]. In another study, higher nitrate removal efficiency and lower amounts of dissolved oxide were found in luffa, so it was considered better as a carbon substrate for PRB over a more extended period than peanut, walnut, and almond shells [53].

The study performed by [45] reported that the organic substrate content influenced the nitrate removal efficiency, the highest removal efficiency (97%) was performed with a 100% hazelnut shell. In contrast, the efficiency for 100% tea residues was 32%, while the highest efficiency (64%) was achieved at 40% tea residues. These tests agree with those reported by Özkaraova et al. [53] wherein the column test, the highest efficiency obtained (90%) for peanut shells was at 60%. In addition, it was indicated that the luffa obtained a removal efficiency of 96 % with an HRT of 78 h and an initial concentration of 30-32 mg/L N-NO_3^-. The different dissolved oxygen levels for the peanut shell columns ($\leqslant$7.45 mg/L O_2) and the luffa (< 3 mg/L O_2) indicated the possible existence of different mechanisms and microorganisms during simultaneous anoxic and aerobic denitrification.

The hydraulic residence time (HRT) in the PRB is the time required for the groundwater to interact with the reactive material and the treatment mechanisms to achieve the remediation objectives. The (HRT) depends on the porosity of the reactive material and is related to the groundwater flow velocity. Hazelnut shell and tea residue obtained a removal efficiency of 99% with an evaluated HRT of 78 to 146.4 h and an initial concentration of 32.2 mg/L N-NO3- [45], [53].

Other studies have reported that using ZVI and solid organic carbon sources in PRB, such as wheat straw, increased nitrate removal [11], [21]. This coincides with that obtained by [20] where the removal efficiency increased for mixed systems were ZVI-straw (90.3%) compared to that of straw alone (87.2%). Through these tests, it was identified that substrate percentage, flow rate, high nitrate concentrations, HRT, and carbon release are the key factors influencing the removal efficiency and lifespan of PRBs.

V. DESIGN

The design of permeable reactive barriers depends on various factors such as the contaminants to be treated, the reactive material, the site characteristics, the hydrogeological conditions such as groundwater velocity, direction and hydraulic conductivity of the aquifer k_a, and the reactive materials within the PRB [47], [55]. In addition, the local groundwater hydraulic gradient and the thickness of the PRB must be considered to ensure effective reaction time; excessively large hydraulic gradients can reduce the contact time with the reactive materials [13]. The most reported PRB configurations are shown in Fig. 2.

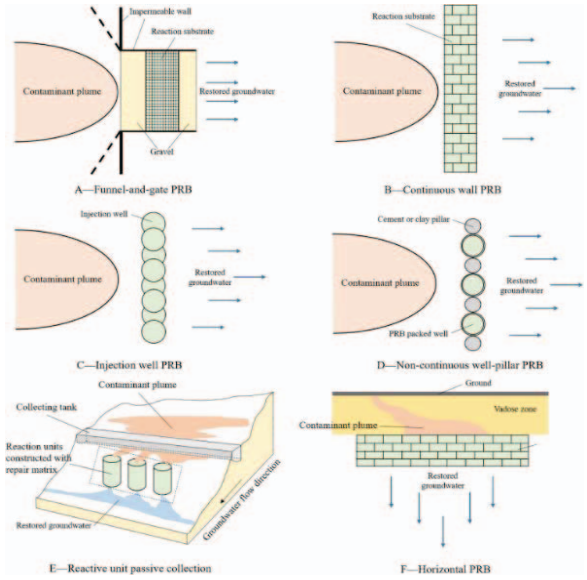


Fig. 2 PRB configurations [24].

A. *Funnel and gate PRB:*

Funnel and gate PRB consists of shear walls that join the groundwater flow (the funnel) into the treatment area (the gate). This configuration is used for widely distributed groundwater flow. Among the difficulties they present is the high construction cost compared to the other types [13], [24].

B. *Continuous wall or continuous trench PRB:*

Continuous wall or continuous trench PRB is perpendicular to the flow of contaminated groundwater and should be considered for narrow groundwater flows. They are characterized by ease of design, construction, and installment

[23], [24]. This configuration was selected in the study performed by [37] due to site characteristics such as clay and shallow aquifer depth. This configuration is suitable where the water table presents a maximum depth of 10 m of excavation [13].

C. Injection Well PRB:

The treatment area of each injection well is interspersed with each other. The contaminated groundwater flows into the reaction well, where the reactive material is located for removing contaminants [24].

D. Non-continuous shaft abutment PRB:

It is suitable for areas where the aquifer is very thick and there is a great depth to the water table. This configuration can be installed at elevated depths below the water table up to tens or hundreds of meters [13].

E. Passive PRB collection of reactive units:

This configuration is suitable for the remediation of a point source of contamination since the collector collects the contaminated water, and this flows to the reaction units where the reactive materials are located, and the treatment will be performed [24].

F. Horizontal PRB:

This configuration removes contaminants before they infiltrate into the groundwater. In this study [56] nitrate removal was performed in the soil up to 80 cm below the horizontal PRB. In another study [57] a horizontal PRB of wood chips and soil reduced nitrate concentration and increased the denitrification rate within the PRB and soil. The wood chips enhanced denitrification by providing bioavailable carbon for indigenous microbial growth, and more nitrate was removed below the PRB than in native soil without PRB [56], [57].

G. Multiple PRB:

Multiple PRBs are one of the most innovative configurations [47]. Multiple PRBs can reduce, oxidize and perform adsorption of the contaminant [19]. Another study tested the removal efficiency of nitrate and phosphate through two connected columns, one to treat nitrate with reactive wood chip material and the other to treat phosphate with basic oxygen furnace slag (BOF), for 1.6 years. It was concluded that both pollutants could be treated sequentially, where nitrate is removed by denitrification and phosphate is removed by precipitation [22]. In this regard, Yang et al. [58] evaluated corn cob as a carbon source in simultaneous denitrification and desulfurization processes and identified heterotrophic denitrifying, sulfate-reducing, autotrophic denitrifying, and hydrolyzing bacteria can coexist in different S/N ratios. However, a non-optimal design could decrease nitrate removal efficiency (15-20%) [36]. In this study, nitrogen reduction was limited because a BOF PRB was placed over a sawdust PRB, which decreased microbial activity and nitrate removal efficiency (42%) [28].

Table 1 shows the studies found in the last five years (2018-2022) on permeable reactive barriers employed in situ for the remediation of nitrate-contaminated groundwater. These studies were developed in China, Brazil, the United Kingdom, and the United States with temperatures between 16°C and 31°C and pH between 6 and 7.85. These studies were mainly based on heterotrophic denitrification, where a solid source of organic carbon, such as wheat straw, corn cob straw, mulch, wood chips, sawdust, and corn cob, was used as reactive material.

These studies agree that increasing nitrate concentration in the influent decreases the removal efficiency. Gibert et al. [37] evaluated the nitrate concentration in the influent between 1 to 530 mg/L, and it was obtained in the PRB with mulch with reactive material, up to 280 mg/L of nitrate were removed with a removal efficiency ⩾97%. Similarly, [29] obtained that, at nitrate concentrations of 354.16 mg/L, a removal efficiency of 85.9% was obtained. While with an initial nitrate concentration of 88.54 mg/L, the nitrate removal efficiency was 99.8%, using corn cob as the reactive material.On the other hand, wheat straw was proposed as a suitable alternative to wood chips as a reactive material for in situ PRB; nitrate removal efficiency reached 90%, with no risk of secondary contamination [26]. The HRT within these reported PRBs ranged from 1 to 38 days, influencing the nitrate removal, with higher removal obtained with an HRT of 20 h, compared with 2.5 h [29]. In addition, it was shown that PRB could be an alternative for sanitation in rural communities [28] and improve nitrate removal during rapid infiltration for managed aquifer recharge (MAR) [56]. Among the configurations used in these studies were reported in continuous wall studies [21], [26], [29], [37], while horizontal PRB [28], [56] and injection well PRB the study [13].

TABLE I. IN SITU PERMEABLE REACTIVE BARRIERS FOR THE TREATMENT OF NITRATE-CONTAMINATED GROUNDWATER

Location	*Reactive material*	*Initial concentration NO_3^- (mg/L)*	*Dimension L, P, e (m)*	*Temperature (°C)*	*pH*	*HRT (days)*	*Removal efficiency (%)*	*Test period (days)*	*Ref.*
China	ZVI, active carbon, coarse sand (3:1:6) v/v	74-121	10, 14.5	-	-	1	> 80	10	[13]
China	Wheat straw, corn straw, corn cob (75%), ZVI	20,86–58,52	60, 6.5, 1.2	-	6-7.75	22	> 60	370	[21]
China	Wood chips, corn stover, wheat straw, corn cob	20.86 a 58.52	40, 6.5, 1.2	-	7.38-7.85	25-38	68.22 - 70.20	365	[26]
Brazil	Wood chips and fine gravel (6:4) v/v	354,16	D = 1.5, P = 0.5	17 y 25	6.5-7.5	1-2	42	365	[28]
China	Corn cob	88.54, 354.16	-	16	6.8	1	99.8, 85.9	15	[29]
United kingdom	Gravel and mulch 50%	280	20, 1.7, 1.8	-	6.8 ± 0,5	14	>97	340	[37]
United States	Wood chips	97.39-110.68	Area de 1 m^2, P=0.30	12 a 31	-	-	*6.64 g/day/m^2	14-15	[56]

L= length, P=depth, e=thickness. *Removel rate

VI. MODELING

Numerical modeling of groundwater flow and transport of a contaminant is a helpful tool for design optimization and performance evaluation of the PRB; these results are fundamental for evaluating PRBs before their final design and field installation [59]. One of the most widely used software for groundwater flow modeling is MODFLOW [60], which is based on finite differences. This program performs the flow simulation that MT3DMS follows to analyze the contaminant transport in the study area [7], [46], [47], [59]. The governing equations for groundwater hydraulics are energy, momentum, mass conservation, and Darcy's law [46], while solute transport obeys Darcy's and Fick's laws [61].

In a study [47], three PRBs consecutively at different locations from the source were simulated by Modflow, in which the performance for five years was evaluated. It was concluded that multiple PRBs are superior to a single PRB system and natural attenuation processes in aquifers. Rad et al. [46] used MODFLOW-MT3DMS and an optimization algorithm with a genetic algorithm to determine the dimensions, optimal location, efficiency, and cost estimation of PRB. It was concluded that the thickness of PRB greatly influences the reduction of pollutant concentration and treatment costs compared to the other dimensions, depth, and length. This agrees with [62], which indicates that thickness is one of the most critical parameters and dimensions for PRB design. A higher thickness could contribute to a better contaminant removal rate due to the increase in residence time (HRT) for contaminant removal by the reactive materials before the contaminated water passes the PRB [47].

On the other hand, it was identified that maintaining 100% barrier by reactive materials could ensure the complete treatment of contaminants [55]. Another study concluded by Morris analysis and numerical simulation using MODFLOW and MT3DMS that the higher the KPRB, length, and thickness of the PRB and the removal capacity of the reactive material, the higher the removal efficiency. However, the higher the pollutant concentration and hydraulic gradient, the lower the removal efficiency [61].

Singh et al. [63] evaluated the long-term performance of continuous PRB for five years. Similarly, [64] used MODFLOW- RT3D to predict the longevity of a PRB used for acidic groundwater treatment. Another study evaluated the changes in water flow rates due to different PRB configurations (continuous wall, funnel, and gate), the effect of PRB hydraulic conductivity over time, and its effect on barrier performance [59]. On the other hand, Chen et al. [65] developed a numerical model for multispecies solute transport using COMSOL Multiphysics 5.0 to compare the analytical solutions. It was found that the responsiveness of the aquifer is vital in determining the required thickness of the PRB.

The response surface area (RSM) was used as a statistical optimization model to describe the effect of the design variables of a PRB based on factorial analysis. It was concluded that there is a proportional correlation between the residence time, thickness, and hydraulic conductivity of the reactive barrier material [66]. In addition, [62] determined the most feasible reactive material for removing a contaminant concerning optimal conditions such as cost and residence time.

Artificial Neural Network (ANN) is also valuable for water resources problems. A model was developed to predict the stabilization process of pollutants. It was obtained that, among the analyzed pollutants, the estimation of nitrate is more accurate [67]. This coincides with that obtained by [68], where nitrate contamination of groundwater was simulated as a function of location, land use, and meteorological and hydrogeochemical data. The simulation was based on root mean square error (RMSE) and Nash-Sutcliffe model efficiency indicators (NSE). On the other hand, [39] evaluated the behavior of the biofilm attached to a solid organic substrate (*Saccharum spontaneum L.)* and its effect on carbon release, carbon transport, and consumption; nitrate transport and consumption simulated with AQUASIM software. The previous studies agree on the importance of the preliminary design of the permeable reactive barrier, where the residence time, thickness, and hydraulic conductivity of the reactive material are significant factors for efficient contaminant removal.

CONCLUSION

Permeable reactive barriers for contaminant removal have been extensively studied. In this review, the articles found were studies mainly focused on laboratory analysis, state of the art, modeling, and in situ studies. In recent years there has been an increasing application of in situ permeable reactive barriers addressing the pollutant nitrate. However, there is a need for further in situ studies, which will allow a greater understanding of the longevity of PRB for the remediation of nitrate-contaminated groundwater under the study site's environmental, geological and hydrological conditions. Solid organic substrates based on agricultural residues such as wheat straw, rice straw, mulch, luffa, and corn cob are innovative for groundwater treatment in permeable reactive barriers. Studies showed they are efficient as reactive materials for nitrate removal in groundwater. However, the accelerated release of carbon in the initial stages could be limiting for some wastes. Therefore, future studies should address the longevity and physical characteristics of the reactive materials, such as hydraulic conductivity and porosity, for a better understanding of these. Site environmental conditions and denitrifying microorganisms are critical to the denitrification process. Agricultural waste-based reactive materials provide a carbon source and function as biofilm carriers. In addition, the PRB configuration depends on the aquifer characteristics and treatment objectives. Moreover, preliminary modeling is critical to determine parameters and evaluate the performance of the permeable reactive barrier prior to field implementation. Studies indicate that permeable reactive barriers based on solid organic substrates are an efficient and low-cost alternative for the remediation of nitrate-contaminated waters.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (https://www.senacyt.gob.pa/) for its financial support to the Master of Science program in Mechanical Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering (https://fim.utp.ac.pa/) of the Universidad Tecnológica de Panama (https://utp.ac.pa/) and to project FIED19-R2-018 "Evaluation of Sustainable Treatment Alternatives for Removing Nitrate from Contaminated Waters" in which this research is framed. Also, the authors would like to thank the Sistema Nacional de Investigación (SNI) for its support.

REFERENCE

[1] Unesco, " Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible," *Un Water*, 2022.

[2] O. Al-Hashimi *et al.*, "A comprehensive review for groundwater contamination and remediation: Occurrence, migration and adsorption modelling," *Molecules*, vol. 26, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/MOLECULES26195913.

[3] E. Abascal, L. Gómez-Coma, I. Ortiz, and A. Ortiz, "Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies," *Science of the Total Environment*, vol. 810. Elsevier B.V., Mar. 01, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152233.

[4] S. Saleem, J. Levison, B. Parker, R. Martin, and E. Persaud, "Impacts of Climate Change and Different Crop Rotation Scenarios on Groundwater Nitrate Concentrations in a Sandy Aquifer," *Sostenibilidad*, 2020, doi: 10.3390/su12031153.

[5] S. K. M. Huno, E. R. Rene, E. D. van Hullebusch, and A. P. Annachhatre, "Nitrate removal from groundwater: A review of natural and engineered processes," *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 67, no. 8, pp. 885–902, Dec. 2018, doi: 10.2166/aqua.2018.194.

[6] J. Xin, Y. Wang, Z. Shen, Y. Liu, H. Wang, and X. Zheng, "Critical review of measures and decision support tools for groundwater nitrate management: A surface-to-groundwater profile perspective," *J Hydrol (Amst)*, vol. 598, p. 126386, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126386.

[7] I. Karlović, K. Posavec, O. Larva, and T. Marković, "Numerical groundwater flow and nitrate transport assessment in alluvial aquifer of Varaždin region, NW Croatia," *J Hydrol Reg Stud*, vol. 41, p. 101084, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.EJRH.2022.101084.

[8] M. Gutiérrez, R. N. Biagioni, M. T. Alarcón-Herrera, and B. A. Rivas-Lucero, "An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems," *Science of the Total Environment*, vol. 624. Elsevier B.V., pp. 1513–1522, May 15, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.252.

[9] O. Gibert, S. Pomierny, I. Rowe, and R. M. Kalin, "Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB)," *Bioresour Technol*, vol. 99, no. 16, pp. 7587–7596, Nov. 2008, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2008.02.012.

[10] R. Barzegar *et al.*, "Risk Assessment of Nitrate Pollution in the Shallow Groundwater of the Mihe Alluvial-Diluvial Fan Based on a DEA Model," *Water (Basel)*, vol. 1360, p. 14, 2022, doi: 10.3390/w14091360.

[11] P. Kijjanapanich and Y. Yaowakun, "Enhancement of Nitrate-Removal Efficiency Using a Combination of Organic Substrates and Zero-Valent Iron as Electron Donors," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 145, no. 4, p. 04019006, Apr. 2019, doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001509.

[12] FAO and PNUMA, "Evaluación mundial de la contaminación del suelo – Resumen para los formuladores de políticas," Roma, Italy, 2022. doi: https://doi.org/10.4060/cb4827es.

[13] Q. Guan, F. Li, X. Chen, C. Tian, C. Liu, and D. Liu, "Assessment of the use of a zero-valent iron permeable reactive barrier for nitrate removal from groundwater in the alluvial plain of the Dagu River, China," *Environ Earth Sci*, vol. 78, no. 7, Apr. 2019, doi: 10.1007/S12665-019-8247-7.

[14] K. Hiller-Bittrolff, K. Foreman, A. N. Bulseco-McKim, J. Benoit, and J. L. Bowen, "Effects of mercury addition on microbial community composition and nitrate removal inside permeable reactive barriers," *Environmental Pollution*, vol. 242, pp. 797–806, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2018.07.017.

[15] D. E. Burkepile *et al.*, "Nitrogen Identity Drives Differential Impacts of Nutrients on Coral Bleaching and Mortality," *Ecosystems*, vol. 23, no. 4, pp. 798–811, Jun. 2020, doi: 10.1007/s10021-019-00433-2.

[16] A. Richa, S. Touil, and M. Fizir, "Recent advances in the source identification and remediation techniques of nitrate contaminated groundwater: A review," *J Environ Manage*, vol. 316, p. 115265, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.115265.

[17] World Health organization, *Guidelines for drinking-water quality*, vol. 1. 2004.

[18] B. Misstear, D. Banks, and L. Clark, "Appendix 5 FAO irrigation water quality guidelines," in *Vater Wells and Boreholes*, 2017, pp. 473–474. doi: 10.1002/9781119080176.app5.

[19] J. Ye, X. Chen, C. Chen, and B. Bate, "Emerging sustainable technologies for remediation of soils and groundwater in a municipal solid waste landfill site -- A review," *Chemosphere*, vol. 227, pp. 681–702, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.04.053.

[20] W. Zhang, Y. Bai, X. Ruan, and L. Yin, "The biological denitrification coupled with chemical reduction for groundwater nitrate remediation via using SCCMs as carbon source," *Chemosphere*, vol. 234, pp. 89–97, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.06.005.

[21] C. Guo, L. Qi, Y. Bai, L. Yin, L. Li, and W. Zhang, "Geochemical stability of zero-valent iron modified raw wheat straw innovatively applicated to in situ permeable reactive barrier: N2 selectivity and long-term denitrification," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 224, p. 112649, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112649.

[22] A. Buyanjargal, J. Kang, B. E. Sleep, and S. W. Jeen, "Sequential treatment of nitrate and phosphate in groundwater using a permeable reactive barrier system," *J Environ Manage*, vol. 300, p. 113699, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.113699.

[23] A. A. H. Faisal, • A H Sulaymon, and • Q M Khaliefa, "A review of permeable reactive barrier as passive sustainable technology for groundwater remediation," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, pp. 1123–1138, 2018, doi: 10.1007/s13762-017-1466-0.

[24] B. Zhao, Z. Sun, and Y. Liu, "An overview of in-situ remediation for nitrate in groundwater," *Science of The Total Environment*, vol. 804, p. 149981, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.149981.

[25] G. Kwame Amoako-Nimako, X. Yang, and F. Chen, "Denitrification using permeable reactive barriers with organic substrate or zero-valent iron fillers: controlling mechanisms, challenges, and future perspectives," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 17, pp. 21045–21064, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13260-7/Published.

[26] W. Zhang, N. Shan, Y. Bai, and L. Yin, "The innovative application of agriculture straw in in situ field permeable reactive barrier for remediating nitrate-contaminated groundwater in grain-production areas," *Biochem Eng J*, vol. 164, p. 107755, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.BEJ.2020.107755.

[27] H. Zhong *et al.*, "Solid-phase denitrification for water remediation: processes, limitations, and new aspects," *Critical Reviews in Biotechnolog*, vol. 40, no. 8, pp. 1113–1130, 2020, doi: 10.1080/07388551.2020.1805720.

[28] A. V. Suhogusoff *et al.*, "Dynamics of nitrate degradation along an alternative latrine improved by a sawdust permeable reactive barrier (PRB) installed in an irregular settlement in the municipality of São Paulo (Brazil)," *Ecol Eng*, vol. 138, pp. 310–322, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2019.08.001.

[29] Y. Liu, Y. Liu, L. Ma, Y. Gong, and J. Qian, "Corncob PRB for on-site nitrate removal in groundwater," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, no. 20, Oct. 2020, doi: 10.1007/s12517-020-06089-w.

[30] F. Zhang *et al.*, "Research progress in solid carbon source–based denitrification technologies for different target water bodies," *Science of The Total Environment*, vol. 782, p. 146669, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.146669.

[31] E. M. Deago and G. E. Pizarro, "Denitrification of drinking water using Saccharum spontaneum L. as a natural organic solid substrate," *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 62, no. 7, pp. 477–486, 2013, doi: 10.2166/aqua.2013.115.

[32] E. Deago and G. Pizarro, "Typha angustifolia L. evaluada como sustrato solido orgánico natural para biorremediar agua subterránea contaminada con nitrato," *I+D Tecnológico*, vol. 11, no. 1, 2015.

[33] C. Ruz Vargas, L. Samaniego, and M. Rangel Medina, "Estado actual del monitoreo de agua subterránea en América Latina e Introducción al programa GGMN," *Agua-LAC*, vol. 12, no. 1, pp. 118–126, 2020.

[34] Comité de alto nivel de seguridad hídrica, "Plan Nacional de seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para todos," Panamá, 2016.

[35] Naciones Unidas, "Objetivos de desarollo sostenible: ODS 6 Agua limpia y saneamiento ," 2016. https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#agua-limpia-saneamiento (accessed May 09, 2022).

[36] A. Grau-Martínez, C. Torrentó, R. Carrey, A. Soler, and N. Otero, "Isotopic evidence of nitrate degradation by a zero-valent iron permeable reactive barrier: Batch experiments and a field scale

study," *J Hydrol (Amst)*, vol. 570, pp. 69–79, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2018.12.049.

[37] O. Gibert, A. Assal, H. Devlin, T. Elliot, and R. M. Kalin, "Performance of a field-scale biological permeable reactive barrier for in-situ remediation of nitrate-contaminated groundwater," *Science of The Total Environment*, vol. 659, pp. 211–220, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.340.

[38] C. Liu, X. Chen, S. A. Banwart, W. Du, Y. Yin, and H. Guo, "A novel permeable reactive biobarrier for ortho-nitrochlorobenzene pollution control in groundwater: Experimental evaluation and kinetic modelling," *J Hazard Mater*, vol. 420, p. 126563, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126563.

[39] E. M. Deago de León, "Denitrification Modeling using Natural Organic Solid Substrates as Carbon Sources," *Tecnologia y Ciencias del Agua*, vol. 12, no. 2, pp. 1–38, Apr. 2021, doi: 10.24850/J-TYCA-2021-02-07.

[40] J. J. Sánchez-Balseca, I. M. Muñoz-Rodríguez, and M. B. Aldás-Sandoval, "Biological treatment of wastewater denitrification using a biofilm reactor with rice husk as an energy source," *Tecnologia y Ciencias del Agua*, vol. 10, no. 2, pp. 78–97, 2019, doi: 10.24850/j-tyca-2019-02-03.

[41] W. Zhang, X. Ruan, Y. Bai, and L. Yin, "The characteristics and performance of sustainable-releasing compound carbon source material applied on groundwater nitrate in-situ remediation," *Chemosphere*, vol. 205, pp. 635–642, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.04.133.

[42] G. Liu, S. Yao, L. Liu, S. Zhang, and X. Tang, "Nitrate Removal from Groundwater by Heterotrophic and Electro-Autotrophic Denitrification," 2022, doi: 10.3390/w14111759.

[43] L. Qi, L. Li, L. Yin, and W. Zhang, "Study on the properties of denitrifying carbon sources from cellulose plants and their nitrogen removal mechanisms," *Water Science and Technology*, vol. 85, no. 2, pp. 719–730, Jan. 2022, doi: 10.2166/wst.2021.626.

[44] M. Capodici, A. Avona, V. A. Laudicina, and G. Viviani, "Biological groundwater denitrification systems: Lab-scale trials aimed at nitrous oxide production and emission assessment," *Science of The Total Environment*, vol. 630, pp. 462–468, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.02.260.

[45] E. B. Özkaraova, R. M. Kalin, S. Gkiouzepas, and C. W. Knapp, "Industrial and agricultural wastes as a potential biofilter media fogroundwater nitrate remediation," *Desalination Water Treat*, vol. 172, pp. 330–343, Dec. 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.25015.

[46] P. R. Rad and A. Fazlali, "Optimization of permeable reactive barrier dimensions and location in groundwater remediation contaminated by landfill pollution," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 35, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101196.

[47] R. Singh, S. Chakma, and V. Birke, "Numerical modelling and performance evaluation of multi-permeable reactive barrier system for aquifer remediation susceptible to chloride contamination," *Groundw Sustain Dev*, vol. 10, p. 100317, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.GSD.2019.100317.

[48] H. Wang, N. Chen, C. Feng, Y. Deng, and Y. Gao, "Research on efficient denitrification system based on banana peel waste in sequencing batch reactors: Performance, microbial behavior and dissolved organic matter evolution," *Chemosphere*, vol. 253, p. 126693, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126693.

[49] Y. Ling *et al.*, "Release Mechanism, Secondary Pollutants and Denitrification Performance Comparison of Six Kinds of Agricultural Wastes as Solid Carbon Sources for Nitrate Removal," *International Journal of Environmental Research and Public Health Article Public Health*, vol. 18, 2021, doi: 10.3390/ijerph.

[50] D. Chen, P. Chen, X. Zheng, W. Cheng, Q. Wang, and X. Wei, "Enhanced Denitrification of Integrated Sewage Treatment System by Supplementing Denitrifying Carbon Source," 2021, doi: 10.3390/ijerph18189569.

[51] S. Gao *et al.*, "Effectiveness of agricultural waste in the enhancement of biological denitrification of aquaculture wastewater," *PeerJ*, vol. 10, p. e13339, Apr. 2022, doi: 10.7717/peerj.13339.

[52] L. ji Yu, T. Chen, and Y. Xu, "Effect of corn cobs as external carbon sources on nitrogen removal in constructed wetlands treating micro-polluted river water," *Water Science and Technology*, vol. 79, no. 9, pp. 1639–1647, 2019, doi: 10.2166/wst.2019.156.

[53] E. B. Özkaraova, S. Aydin, and A. U. Gemechu, "Screening of organic substrates for a permeable biobarrier to remediate nitrate contaminated groundwater," *Water and Environment Journal*, vol. 36, no. 1, pp. 43–55, 2022.

[54] V. Grießmeier, K. Leberecht, and J. Gescher, "Minireview NO 3 − removal efficiency in field denitrification beds: key controlling factors and main implications," 2019, doi: 10.1111/1758-2229.12758.

[55] A. K. Thakur, M. Vithanage, D. B. Das, and M. Kumar, "A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment," *Environ Technol Innov*, vol. 19, p. 100917, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.ETI.2020.100917.

[56] S. Beganskas *et al.*, "A horizontal permeable reactive barrier stimulates nitrate removal and shifts microbial ecology during rapid infiltration for managed recharge," *Water Res*, vol. 144, pp. 274–284, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.WATRES.2018.07.039.

[57] G. Gorski, H. Dailey, A. T. Fisher, N. Schrad, and C. Saltikov, "Denitrification during infiltration for managed aquifer recharge: Infiltration rate controls and microbial response," *Science of The Total Environment*, vol. 727, p. 138642, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.138642.

[58] B. Yang *et al.*, "Effects of simultaneous denitrification and desulfurization and changes of microbial community structure with corncob solid slow-release carbon source under different S/N ratios," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 47, p. 102737, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.JWPE.2022.102737.

[59] S. Johana Grajales-Mesa, "Designing a permeable reactive barrier to treat TCE contaminated groundwater: Numerical modelling," *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 2020, doi: 10.24850/j-tyca-2020.

[60] U.S. Geological Survey (USGS), "Modflow: Modular Hydrologic model" 1981.

[61] L. Ma, · Chao Zhang, S. Liu, Q. Luo, R. Zhang, and J. Qian, "Sensitivity analysis of factors influencing pollutant removal from shallow groundwater by the PRB method based on numerical simulation," *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-21406-4.

[62] I. Maamoun, O. Eljamal, O. Falyouna, R. Eljamal, and Y. Sugihara, "Multi-objective optimization of permeable reactive barrier design for Cr(VI) removal from groundwater," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 200, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110773.

[63] R. Singh, S. Chakma, and V. Birke, "Long-Term Performance Evaluation of Permeable Reactive Barrier for Groundwater Remediation Using Visual MODFLOW," in *Environmental Processes and Management. Water Science and Technology Library*, Springer., vol. 91, 2020, pp. 311–320. doi: 10.1007/978-3-030-38152-3_16.

[64] S. Medawela and B. Indraratna, "Computational modelling to predict the longevity of a permeable reactive barrier in an acidic floodplain," *Comput Geotech*, vol. 124, p. 103605, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.COMPGEO.2020.103605.

[65] H. Chen, E. Park, and · Cheng Hu, "A design solution of PRB with multispecies transport based on a multi-domain system," *Environ Earth Sci*, vol. 77, p. 630, 2018, doi: 10.1007/s12665-018-7804-9.

[66] I. Maamoun, O. Falyouna, R. Eljamal, K. Bensaida, and O. Eljamal, "Optimization modeling of nFe0/Cu-PRB Design for Cr(VI) removal from groundwater," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 12, no. 3, pp. 131–138, May 2021, doi: 10.18178/IJESD.2021.12.5.1330.

[67] A. Naghikhani, A. Jodeiri, A. Karbassi, M. Baghdadi, A. Sarang, and A. H. Buchali Safiee, "Investigating the artificial intelligence methods for determining performance of the NZVI permeable reactive barriers," *Groundw Sustain Dev*, vol. 12, p. 100516, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.GSD.2020.100516.

[68] A. Yakirevich, D. Cicchella, C. Stylianoudaki, I. Trichakis, and G. P. Karatzas, "Modeling Groundwater Nitrate Contamination Using Artificial Neural Networks," 2022, doi: 10.3390/w14071173.

Evaluation of a cocoa solar dryer prototype in Cilico Creek, Ngäbe Bugle

Evaluación de un prototipo de secador solar de cacao en Cilico Creek, Ngäbe Buglé

Yoel Martin
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
yoel.martin@utp.ac.pa

Félix Henríquez
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
felix.henriquez@utp.ac.pa

Orlando Melgar
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
orlando.melgar@utp.ac.pa

Luis Mogollón
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
luis.mogollon@utp.ac.pa

***Abstract*— The aim of this work was to evaluate the performance of a mixed type cocoa solar dryer prototype of induced circulation, in the Cilico Creek community, in the Ngäbe Bugle region. The evaluation was carried out by studying the design and operation variables of the prototype, consisting of two parts. First, the performances of three solar dryers were compared during a five-day drying period, considering the temperatures inside the drying chambers and moisture content of the cocoa beans of each dryer. The solar dryers were identified as: Solar Dryer A and Solar Dryer B (mixed type dryers); and Greenhouse Dryer (existing in the community), being Solar Dryer B the object of evaluation. Second, the design variables of Solar Dryer B were calculated, such as: total energy, temperature increase, and the volume of air needed to evaporate the moisture in the cocoa beans. Also, the operation variables such as: total energy supplied to the system, measured temperature increase, efficiency of the drying system, and specific energy consumption were calculated. The results showed a final moisture content in the cocoa beans from Solar Dryer B of 10.31%, an average temperature increase of 2.2℃ over ambient temperature, and a total heat supplied of 74.5 MJ during the drying period. An efficiency of 22.82% and a specific energy consumption of 2.75 kWh/kg were shown.**

Keywords*— solar dryer, cocoa, moisture, temperature, efficiency, specific energy consumption.

***Resumen*— El objetivo de este trabajo fue evaluar el funcionamiento de un prototipo de secador solar de cacao tipo mixto con circulación inducida, en la comunidad Cilico Creek, comarca Ngäbe Buglé. La evaluación se realizó mediante el estudio de las variables de diseño y funcionamiento del prototipo, consistiendo en dos partes. Primero, se compararon los funcionamientos de tres secadores solares durante un periodo de secado de cinco días, tomando en cuenta los valores de temperaturas en las cámaras de secado y el contenido de humedad en los granos de cacao de cada secador. Los secadores solares se identificaron como: Secador Solar A y Secador Solar B (secadores tipo mixto); y Secador Invernadero (existente en la comunidad), siendo el Secador Solar B el objeto de evaluación. Segundo, se calcularon las variables de diseño del Secador Solar B, tales como: la energía total, el aumento de temperatura y el volumen de aire necesario para evaporar la humedad en los granos de cacao. También, se calcularon las variables de funcionamiento tales como: la energía total suministrada al sistema, el aumento de temperatura medido, la eficiencia del sistema de secado y el consumo específico de energía. Los resultados mostraron un contenido final de humedad en los granos de cacao del Secador Solar B de 10.31%, un aumento de temperatura promedio de 2.2℃ sobre la temperatura ambiental y un calor total suministrado de 74.5 MJ durante el periodo de secado. Se mostró una eficiencia de 22.82% y un consumo específico de energía de 2.75 kWh/kg.**

Palabras claves*— *secador solar, cacao, humedad, temperatura, eficiencia, consumo específico de energía.

I. INTRODUCCIÓN

El cacao es un fruto proveniente del árbol llamado *Theobroma cacao L.* Es principalmente reconocido por ser la materia prima para la producción del chocolate a nivel mundial. Este fruto ofrece además grandes beneficios en todas sus aplicaciones, desde la parte medicinal, hasta los productos cosméticos [1].

Los árboles de cacao se encuentran en regiones cercanas al ecuador terrestre. Estas regiones ofrecen las condiciones adecuadas para su crecimiento. El *Theobroma cacao L.* requiere de alta temperatura, alta humedad y constantes lluvias para crecer y florecer [2]. Esto indica que los bosques tropicales húmedos son el tipo de ecosistema en el cual se pueden encontrar los árboles de cacao en su mayoría.

El secado del cacao corresponde a la segunda etapa del proceso de la post cosecha, posterior a la fermentación de los granos. El objetivo del secado es llevar la humedad de los granos a niveles entre 6 a 8%. Este proceso puede tardar entre 7 a 10 días, utilizando métodos tradicionales como secado directo al sol y secado dentro de estructuras tipo invernadero. Sin embargo, el tiempo de secado y la calidad de los granos de cacao al finalizar esta etapa dependen estrictamente de las condiciones climáticas ambientales y la exposición a factores externos. Los contenidos finales de humedad en los granos de

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00081

cacao deben estar en el rango sugerido ya que, niveles superiores al 8% de humedad establecen un riesgo de crecimiento de moho, mientras que los niveles inferiores al 6% causan el desarrollo de estructuras quebradizas en los granos y pérdida de su aroma. Adicionalmente, se recomienda secar el cacao a temperaturas menores a 60 °C, ya que altas temperaturas pueden afectar las propiedades de los granos [3].

La investigación se llevó a cabo en la comunidad de Cilico Creek. Esta comunidad se ubica en el corregimiento de Tuwai, en la comarca Ngäbe Buglé, Panamá. Se estima que la comunidad cuenta con aproximadamente 500 habitantes. Cilico Creek se caracteriza por ser productora de cacao orgánico. Actualmente, cuenta con la Cooperativa Solary R.L., en donde se unen productores con amplios conocimientos tradicionales a cerca del cultivo y cosecha para la elaboración de productos de cacao [4].

La comunidad de Cilico Creek presenta grandes cantidades de precipitación durante todo el año, con un promedio anual de 2483 mm, contra unos 1992 mm en la Ciudad de Panamá [5]. Esto representa un desafío para los métodos tradicionales de secado utilizados. Estos métodos incluyen el secado directo al sol y en secadores invernadero. La falta de estandarización y organización de los procesos de post cosecha, las enfermedades y otros agentes que afectan el producto durante esta etapa representan otros desafíos que enfrenta la comunidad. Los productores de la comunidad carecen de un control sobre los volúmenes y tiempos de secado. El método utilizado por los productores para identificar que los granos de cacao han alcanzado el nivel final de humedad consiste en escuchar los sonidos que hacen los granos al frotarlos unos con otros. Este método no garantiza un control sobre los contenidos finales adecuados de humedad. La ausencia del control y monitoreo representa una problemática en los niveles de producción a nivel de la comunidad, ya que no se aprovecha parte del potencial que se ofrece en la calidad del cacao. Esta problemática puede ser abordada mediante la implementación de energías renovables utilizando secadores solares.

Los secadores solares son sistemas que aprovechan la energía proveniente del sol para la eliminación de humedad en diferentes tipos de productos. Los alimentos y productos agrícolas son los más comunes en estos secadores. Los sistemas se componen por un colector solar, en donde se capta la radiación incidente y se transfiere al fluido de trabajo con energía térmica, y una cámara de secado, donde se ingresa el producto a deshidratar. Un tipo muy común es el secador solar mixto. Este posee los componentes principales previamente mencionados, en donde la energía solar es absorbida tanto en el colector como en la cámara de secado. Este secador solar puede operar bajo ventilación forzada o ventilación natural. La ventilación forzada consiste en mover el aire a la cámara por medio de un ventilador, mientras que la ventilación natural no utiliza dispositivos de trabajo. La ventilación también puede ser inducida, donde un ventilador extrae el aire de la cámara de secado hacia el ambiente. Los sistemas de secador solar pueden ser también clasificados en otros tipos, los cuales se adecuan a las necesidades específicas de los diferentes productos [6].

Los sistemas de secadores solares ofrecen beneficios para los procesos de secado de productos como el cacao. Un secador solar de colector y cámara ofrece la protección de los granos contra fuentes de contaminación y sus efectos, tales como: partículas, insectos, roedores, pájaros, bacterias, hongos y contaminantes químicos. Adicionalmente, los sistemas de secadores solares resultan económicos en términos energéticos, de insumos y mano de obra. Si se emplea el sistema adecuado, se pueden reducir los tiempos de secado, mejorando la producción y aumentando la eficiencia de esta etapa de la post cosecha del cacao.

Existe una diversidad de sistemas de secadores solares para los procesos de post cosecha y preparación de productos agrícolas. Un estudio realizado por [7] desarrolló un secador solar con material de almacenamiento de calor sensible, para conservar la temperatura en la cámara de secado. El objetivo fue proponer una alternativa en la metodología de secado de calabaza amarga para superar los problemas asociados con el secado directo al sol. Estos problemas incluían la degradación del producto por el viento, insectos, lluvia e interferencia animal. El contenido de humedad del producto pasó de 92% a 9% en 7 horas. La eficiencia del sistema de secado fue de 19% y el consumo específico de energía de 4.44 kWh/kg.

Otro estudio, realizado por [8], diseñó e implementó un secador de cacao a pequeña escala para disminuir los tiempos de secado con respecto a métodos tradicionales. El sistema se diseñó para secar 10 kg de granos de cacao fermentados. El calor total necesario para remover el contenido de humedad fue de 14539 kJ, correspondiente a valores promedio de radiación y temperatura ambiental de 4.5 kWh y 25 °C, respectivamente.

Un tercer estudio, elaborado por [9], realizó un análisis termodinámico de un secador solar de cacao de convección forzada con un material de almacenamiento de calor sensible. El objetivo fue abordar la problemática de los altos costos energéticos que presenta el secado industrial, al igual que la falta de control y la susceptibilidad a daños por insectos, hongos y bacterias que presenta el secado directo al sol. El análisis contempló un flujo de estado estable a través del sistema, basado en la primera y segunda ley de la termodinámica. La energía utilizada por el sistema fue de 0.739 y 0.724 kJ/kg. Por otro lado, las eficiencias del sistema de secado variaron entre 28.0 y 58.2%.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en estudios anteriores, el presente estudio contempla pruebas experimentales de secado de granos de cacao fermentados utilizando dos prototipos de secador solar mixto de circulación inducida, y un secador tipo invernadero existente en la comunidad de Cilico Creek. Los prototipos de secadores solares mixtos se identificaron como Secador Solar A y Secador Solar B, siendo este último el objeto de evaluación. El objetivo del estudio es evaluar el funcionamiento del Secador Solar B, lo cual permite optimizar el proceso de post cosecha del cacao mediante la implementación de tecnología de energías renovables, aumentando la calidad del producto y el rendimiento de la cosecha. Esto beneficiará a la Cooperativa Solary R.L. con soluciones energéticas, en donde se impulsará el emprendimiento y el comercio entre los productores.

II. Materiales y Métodos

A. Descripción del Experimento

La experimentación se llevó a cabo en la Cooperativa Solary R.L. de la comunidad de Cilico Creek, Comarca Ngäbe Buglé. Se comparó el proceso de secado entre dos secadores solares tipo mixto y un secador solar del tipo invernadero durante un periodo de 5 días. Para realizar este proceso, primero se fermentaron 81.65 kg de cacao en baba, obtenido

de 300 mazorcas de diferentes variedades. La masa total de cacao al finalizar la fermentación fue de 55.10 kg, en donde se trasladaron 18 kg de cacao a cada uno de los prototipos de secador solar mixto y 19.10 kg al secador invernadero para iniciar el secado. Cada secador contaba con tres niveles de bandejas, con dos bandejas por nivel. El arreglo de bandejas del Secador Solares A se puede observar en la "Fig. 1". Sobre cada bandeja se colocaron 3.00 kg de granos de cacao fermentados. Los secadores solares mixtos fueron ubicados en la parte posterior de la Cooperativa Solary R.L., con los colectores orientados hacia el sur.

Fig. 1. Interior de la cámara del Secador Solar A, con los granos de cacao distribuidos en los tres niveles de bandejas. Fuente: Propia.

Previo al traslado del cacao desde los fermentadores hacia los secadores, estos fueron armados colocando las 6 bandejas en su respectiva posición. Luego, se insertaron los colectores solares a la cámara de secado. Una vez armados los secadores, se realizó la instalación de los sistemas de ventilación. Los ventiladores instalados en ambos secadores se encargan de extraer el aire de la cámara de secado hacia el exterior. El sistema de ventilación del Secador Solar A estaba compuesto por una celda solar conectada directamente a un ventilador, de manera que el control de la velocidad se diera por la radiación sobre la celda. Esto establece una relación en la que, a mayor radiación, mayor velocidad del ventilador, por lo que no fue necesaria la adquisición de datos de velocidad. El sistema de ventilación del Secador B estaba compuesto por el circuito descrito en la "Fig. 2". Los ventiladores fueron conectados en serie al regulador solar, donde también fue conectado el panel solar, y la batería. Los detalles de estos equipos se observan en la sección de materiales. Bajo esta configuración, el Secador B funcionaría con una velocidad de flujo constante de 3 m/s, en ambos ventiladores.

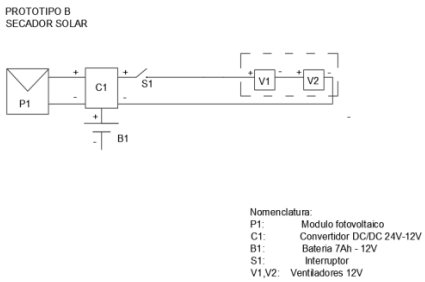


Fig. 2. Circuito de sistema de ventilación para prototipo de Secador Solar B. Fuente: Propia.

En cuanto a la instrumentación, se utilizaron equipos de adquisición de datos de temperatura en los Secadores A, B y en el de tipo invernadero. Para los Secadores A y B, los sensores se colocaron en tres posiciones dentro de la cámara de secado: a la salida del colector solar, en el centro de las bandejas de secado y antes de la salida de los ventiladores, como se describe en la "Fig. 3". Mientras que en el secador tipo invernadero se colocó el equipo de adquisición de datos de temperatura con un solo sensor cerca de los granos de cacao, descrito en la "Fig. 6". Adicionalmente, se colocó un sensor de humedad relativa con adquisición de datos en los Secadores A y B, en la parte inferior dentro de la cámara de secado para efectos de monitoreo (ver "Tabla1").

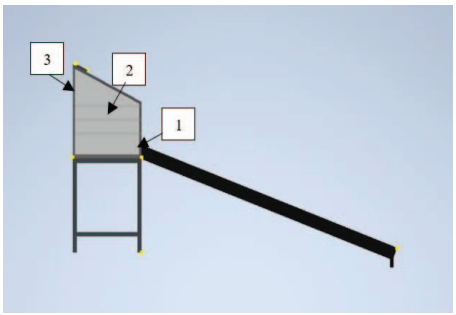


Fig. 3. Vista lateral de prototipo de secador solar mixto con las posiciones de los sensores de temperatura dentro de la cámara de secado. Sensor 1: Salida del colector solar, Sensor 2: Centro de la cámara de secado, Sensor 3: Salida de la cámara de secado. Fuente: Propia.

En el experimento se comparó el contenido de humedad en los granos de cacao de cada secador al igual que las temperaturas dentro de las cámaras. Para el caso de los Secadores A y B, se comparó la humedad de grano con respecto a su nivel de bandejas, al igual que las temperaturas en las diferentes posiciones dentro de la cámara de secado. El propósito de la comparación fue monitorear si los valores de temperatura se mantuvieron por debajo del valor máximo sugerido por [3], en cada uno de los secadores. Por otro lado, también se buscó comparar las curvas de secado en cada uno de los secadores y por nivel de bandejas, de manera que se puedan observar las diferentes tendencias que tienen los secadores. Como último propósito de la comparación, se monitoreó que los contenidos finales de humedad se encuentraran entre el 6 y 8%, sugerido por [3].

Fig. 4. Prototipos construidos de Secador Solar A (Derecha) y B (Izquierda) junto a panel fotovoltaico (Centro) . Fuente: Propia.

B. Materiales

Los instrumentos utilizados para la medición de las diferentes variables y parámetros en este estudio se encuentran en la "TABLA I".

TABLA I. INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN

Instrumento	Modelo	Exactitud
Sensor de Temperatura	88598 4ch K SD Logger	± 0.3% ± 1°C
Sensor de Temperatura	Extech SDL200	± 0.4% + 1°C
Sensor de Humedad y Temperatura	Inkbird IBS-TH2	± 0.3 °C, ± 3% RH
Anemómetro	TPI SP565	± 5%
Balanza de Humedad	Mettler Toledo HB43	± 0.01%
Balanza	EH-250	± 1g

Fuente: Propia.

Entre los equipos utilizados para la experimentación están los prototipos de secador solar mixto de circulación inducida. La estructura de ambos secadores está hecha de perfiles hierro de 1x1" con un espesor de 3/32". La cámara de secado está cubierta con láminas de policarbonato y sellada con silicón. En el Secador Solar A, las láminas son de color gris claro, mientras que en el Secador Solar B son verdes. Los colectores de aire son de 1.7 m^2 de área neta de captación, con un solo acristalamiento. Las bandejas en el Secador Solar A están compuestas de aluminio remachado a una malla del mismo material. En el Secador Solar B, el marco de aluminio de las bandejas va remachado a una malla de poliestireno. Los detalles de las dimensiones del Secador Solar A se muestran en la "Fig.5".

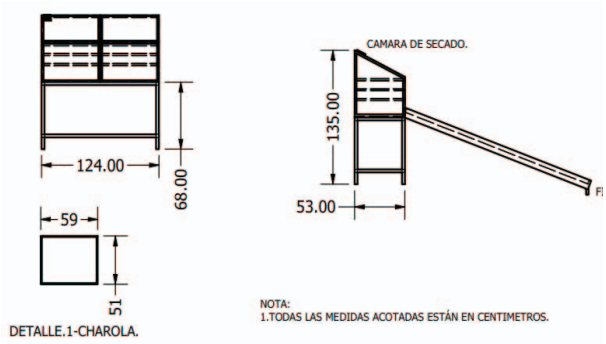


Fig. 5. Dimensiones del Secador Solar A. Fuente: Propia.

Las dimensiones del Secador Solar B son muy similares a las del Secador Solar A. Sin embargo, existen diferencias a tomar en consideración. La altura de la cámara de secado es de 135 cm y la altura a la que entra el colector es de 78 cm. Las bandejas son de 60x55 cm. El ancho y profundidad de la cámara de secado son de 128 y 63 cm, respectivamente.

El Secador Invernadero está compuesto de madera, con una cubierta plástica en la parte superior, como se muestra en la "Fig.6". Dentro del secador la altura es de 1.83 m, mientras que la longitud y el ancho son de 3.72 y 3.43 m, respectivamente. El Secador Invernadero está ubicado a 1.33 m sobre el nivel del suelo.

Fig. 6. Secador Invernadero existente en la comunidad de Cilico Creek. Sensor de temperatura colocado en la posición 1. Fuente: Propia.

Para la extracción de aire de las cámaras de los Secadores A y B, se utilizaron tres ventiladores de 12 V, 4.2W con dimensiones de 120x120mm. Estos ventiladores pueden observarse en la "Fig. 7". Se utilizó un panel solar, un regulador solar convertidor DC-DC y una batería de 12V, con capacidad de 7.0AH/20HR modelo Forza Power Technologies. Adicionalmente, para el control de velocidad del ventilador en el Secador A, se utilizó una celda solar de 21.5x18.5cm. Para moler las muestras de cacao se utilizó un molino Hamilton Beach.

Fig. 7. Vista posterior de prototipo de Secador Solar B con ventilador 1 (Derecha) y ventilador 2 (Izquierda). Fuente: Propia.

C. Muestreo y Mediciones

Cada 24 horas se recolectaron muestras de cacao de cada secador para medir el contenido de humedad en los granos. Se tomaron muestras iniciales, previo al secado, para determinar el punto de partida del proceso. Se tomaron muestras al azar de 20 granos de cacao por nivel de bandejas (superior, medio e inferior), en los Secadores A y B. Estas muestras equivalen a masas entre 35.0 a 45.0 ±1.0 g. Esta masa sigue la proporción de muestreo sugerida por [3]. Las muestras fueron trasladadas, preparadas y analizadas en el Laboratorio de Ensayos de Materiales y Suelo (LEMS), del Centro Regional de Bocas del Toro de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), siguiendo los criterios de [10]. Luego, utilizando la balanza de humedad se midió el contenido de cada una de las muestras que se tomaron por nivel y por secador. Este procedimiento se repitió para cada día de secado, posterior a la recolección de muestras.

La velocidad de los ventiladores fue medida utilizando el anemómetro descrito en la "TABLA 1". Estas mediciones fueron realizadas cada 24 horas, al mismo tiempo que la toma

de muestra de los granos de cacao. La velocidad de los ventiladores solamente fue medida en el prototipo de Secador Solar B. En el caso del prototipo de Secador Solar A, la velocidad del ventilador fue variable, debido a que se regulaba mediante la radiación incidente sobre la celda fotovoltaica.

Por otro lado, los datos de temperatura y humedad fueron descargados al finalizar la etapa de secado, lo cual corresponde al día 5 de la experimentación. Los datos de temperatura ambiental y radiación solar para los días de experimentación fueron descargados de [5].

D. Ecuaciones

La humedad adecuada en los granos de cacao se alcanza mediante el uso energía en forma de calor para lograr el proceso de evaporación de la masa de agua a remover. Previamente al secado, se calculan las variables de diseño para conocer los requisitos del sistema y cumplir con las necesidades del secado. El calor necesario para el proceso de secado del cacao es definido por [11], a continuación:

$$Q_p = C_p\, m_i\, (T_{fc} - T_i) \quad (1)$$

Donde Q_p representa el calor de precalentamiento del sistema (kJ); C_p, el calor específico a presión constante del cacao (kJ/kg ℃); m_i, la masa inicial de cacao (kg); T_{fc}, la temperatura final de la cámara de secado y T_i la temperatura a la entrada del colector solar (℃). Luego, el calor necesario para evaporar Q_e, el contenido de agua en los granos de cacao se define como:

$$Q_e = h_f\, (m_i — m_f) \quad (2)$$

Donde h_f representa el calor latente de vaporización del agua (kJ/kg); m_i y m_f, la masa inicial y final de cacao respectivamente (kg). Las pérdidas de calor Q_l, son representadas por:

$$Q_l = (Q_p + Q_e)10\% \quad (3)$$

Luego, el calor total Q_T, se define por:

$$Q_T = Q_p + Q_e + Q_l \quad (4)$$

Posterior a calcular el calor requerido, se determina el promedio del aumento necesario de temperatura de la cámara de secado ΔT, con respecto a la temperatura ambiental, con la siguiente ecuación sugerida por [12]:

$$\Delta T = 2\beta(T_b — T_c)(I_t/I_o) \quad (5)$$

Donde β representa un parámetro adimensional de corrección de temperatura, entre 0.14 y 0.25, en donde se asume un valor de 0.20, sugerido por [12]. T_b y T_c, representan la temperatura de ebullición y congelación del agua respectivamente (°C); I_t, la radiación incidente promedio sobre el colector solar (W/m^2) y I_o, la constante solar de 1367 W/m^2.

Luego, se calcula el volumen total de aire V_a necesario para evaporar la masa de agua y llevar el contenido de humedad en los granos al nivel adecuado definido por:

$$V_a = (M_w\, h_f\, R_a\, T_a)/[C_{pa}\, P_a(T_o — T_{fa})] \quad (6)$$

Donde M_w representa la masa de agua a evaporar (kg); R_a, la constante de gases ideales 0.287 kJ/kg K; T_a, el promedio de la temperatura ambiental; C_{pa}, el calor específico del aire a presión constante; P_a, la presión parcial de aire seco en la atmósfera (kPa) y T_o, la temperatura de salida del colector solar, correspondiente a la entrada de la cámara de secado. T_{fa} representa la temperatura obtenida a partir del aumento necesario calculado con la relación $T_{fa} = T_a + (0.25\Delta T)$ establecida por [12]. La presión parcial del aire seco en la atmósfera se determina mediante la relación establecida por [13], la cual establece que $P = P_v + P_a$, donde P es la presión total atmosférica y P_v es la presión de vapor.

Una vez calculado el volumen total necesario, [12] sugiere el cálculo del flujo volumétrico promedio G, mediante:

$$G = V_a/t \quad (7)$$

Donde t representa el tiempo de secado en segundos (s).

Luego de definir las variables de diseño para conocer los requisitos del sistema, se calculan las variables de operación para los prototipos de secadores solares mixtos. Los sistemas de secado se analizan como un volumen de control. El prototipo de Secador Solar A cuenta con una sola entrada y salida, mientras que el Secador Solar B cuenta con sola entrada y dos salidas. La entrada de estos sistemas corresponde a la entrada del colector solar, mientras que las salidas corresponden a los ventiladores en la parte posterior de las cámaras de secado. Se utilizan valores de calor específico y densidad del aire promedios, con tal de simplificar los cálculos del calor total transferido en la cámara de secado, utilizando la ecuación descrita a continuación, sugerida por [13]:

$$Q = C_{pa}\, \dot{m}\, (T_{fc} - T_i)(t) \quad (8)$$

Donde $\dot{m}$ representa el flujo másico de aire a través del sistema (kg/s). El flujo másico se define por:

$$\dot{m} = \rho G_o \quad (9)$$

Donde ρ representa la densidad promedio del aire a través del sistema (kg/m^3). En el sistema, el flujo volumétrico G_o, se define por:

$$G_o = v\, (\pi/4)d^2 \quad (10)$$

Donde v representa la velocidad de aire a la salida del ventilador (m/s) y d, el diámetro de la salida del ventilador (m).

Una vez definido el flujo volumétrico, se puede calcular el volumen de aire total utilizando "(7)".

El aumento de temperatura promedio del sistema ΔT, sobre la temperatura ambiental se define a continuación:

$$\Delta T = T_f — T_a \quad (11)$$

Donde T_a representa la temperatura ambiental promedio y T_f representa la temperatura promedio en la cámara de secado (°C).

Otras variables fundamentales del sistema son las de rendimiento. La eficiencia del sistema de secado η, es definida por [14], a continuación:

$$\eta = (M_w h_f)/(IA_c\tau\alpha + IA_{sc}\tau\alpha + P_f) \quad (12)$$

Donde I representa la radiación solar total incidente sobre las superficies en forma de energía (kJ/m^2); A_c y A_{sc}, el área del colector y el área de la cámara de secado respectivamente (m^2); τα, la transmisividad y absortividad del material y P_f, la energía total consumida por el ventilador (kJ).

El consumo específico de energía [7] lo define como la energía total suministrada SEC, por unidad de masa de agua removida (kWh/kg). Se considera la energía térmica por radiación y el trabajo de los ventiladores, y se describe a continuación:

$$SEC = E_T/M_w \quad (13)$$

Por último, la capacidad experimental de cada uno de los secadores representa la masa inicial de cacao en cada secador entre el área de bandejas o superficie en la que se seca. Esta cantidad se expresa en términos de masa de los granos por unidad de área de secado.

III. Resultados y Discusión

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente a partir de cada uno de los secadores se presentan en las "Fig. 8, 9 y 10". En las mismas se visualizan los contenidos de humedad en los granos de cacao en porcentaje, durante de los días de secado. Para los prototipos de Secador Solar A y B, se muestra el contenido de humedad por nivel de bandejas.

En la "Fig.8" se muestra la curva de secado del Secador Invernadero. Dentro del primer día de secado, la curva presentó una mayor pendiente, lo cual se traduce en una mayor razón de secado. Sin embargo, durante los próximos días, la pendiente disminuyó hasta llegar a su valor final al quinto día de secado.

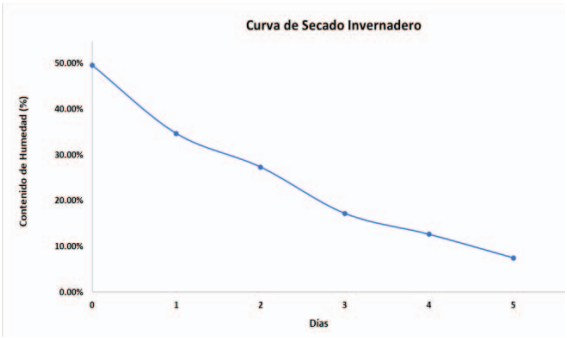


Fig. 8. Gráfico de curva de secado de Secador Invernadero. Fuente: Propia.

En la "Fig.9" se puede observar el gráfico con curvas de secado para cada nivel de bandejas en el Secador Solar A. En este sistema, el Nivel Superior e Inferior muestran una curva de secado muy similar. Sin embargo, el contenido de humedad del Nivel Medio de las bandejas se encuentra muy por encima del resto. Este comportamiento se da a lo largo de todo el periodo de secado, hasta el último día, donde los tres niveles de bandejas alcanzan contenidos de humedad similares. Para el Secador Solar A, los contenidos de humedad finales fueron de 7.16, 7.75 y 7.00% para el Nivel Superior, Medio e Inferior respectivamente.

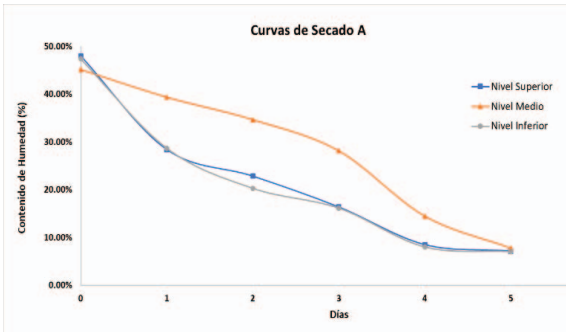


Fig. 9. Gráfico de curva de los diferentes niveles de bandejas del Secador A. Fuente: Propia.

En la "Fig.10" se muestran las curvas de secado con respecto a cada nivel de bandejas del Secador Solar B. El Nivel Superior e Inferior muestran igualmente una curva similar, mientras que la curva del Nivel Medio se encuentra por encima. Este comportamiento se da principalmente entre los días 1 y 3 del periodo de secado. Sin embargo, no es tan notable como en el Secador Solar A. Para el Secador Solar B, los contenidos de humedad finales fueron de 10.48, 11.28 y 9.17% para el Nivel Superior, Medio e Inferior respectivamente.

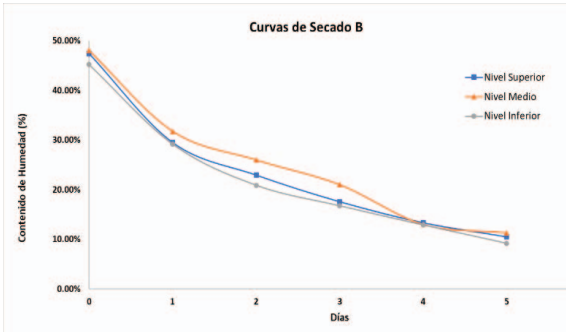


Fig. 10. Gráfico de curva de los diferentes niveles de bandejas del Secador B. Fuente: Propia.

En ambos prototipos de secador solar mixto, el comportamiento del secado fue similar para el Nivel Superior e Inferior de bandejas. Esto se debe a que en el Nivel Inferior predomina el calor proveniente del colector solar, mientras que en el Nivel Superior predomina el calor absorbido por la radiación incidente sobre la cámara de secado.

En la "Fig.11" se presentan las curvas de los tres diferentes secadores utilizados durante el secado en este estudio. Se puede observar que los contenidos iniciales de humedad corresponden a 46.88% para el Secador Solar A, 45.20% para el Secador Solar B y 48.58% para el Secador Invernadero. Las tres curvas describen un comportamiento y una razón de remoción de humedad similar. El contenido final de humedad en los granos de cacao en el Secador Solar A fue de 7.30%, para aquellos en el Secador Solar B fue de 10.31% y en los del Secador Invernadero fue de 7.48%. Observando estos resultados, cabe destacar que el contenido final de humedad del Secador Solar B se encuentra por encima del rango sugerido por [3], mientras los otros dos secadores sí cumplen con valores dentro del rango.

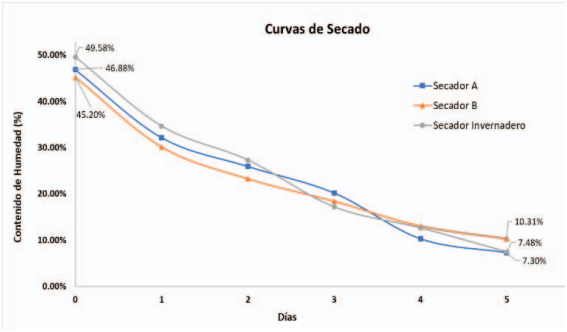


Fig. 11. Gráfico de curvas del proceso de secado de los tres secadores. Fuente: Propia.

La "TABLA II" presenta los resultados de medición de temperatura máxima, mínima y promedio registrado dentro diferentes puntos de la cámara de los secadores solares mixtos descritos en la "Fig. 3", al igual que en el Secador Invernadero durante los días de secado.

TABLA II. TEMPERATURAS EN LOS SECADORES (℃)

	Posición	Max	Min	Prom
	Secador Invernadero	49.9	23.0	30.1
Secador Solar A	Salida de Colector	62.7	23.4	31.0
	Centro de la Cámara	58.7	23.4	32.2
	Salida de la Cámara	64.7	23.1	31.3
Secador Solar B	Salida de Colector	63.5	23.4	30.0
	Centro de la Cámara	55.5	23.3	29.3
	Salida de la Cámara	52.9	23.3	29.4

Fuente: Propia.

Se observa en la "TABLA II" que las temperaturas mínimas en los tres secadores son similares. Por otro lado, el Secador Solar A registró temperaturas promedio superiores a las del Secador Solar B y a las del Secador Invernadero. También, el Secador Solar A registró las temperaturas máximas del proceso. Sin embargo, tanto el Secador Solar A, como el B, excedieron el límite superior de temperatura de 60°C sugerido por [3].

Las velocidades promedio medidas durante el periodo de secado en los ventiladores 1 y 2 en el prototipo de Secador Solar B fueron de 3.10 y 2.81 ± 0.03 m/s.

Los cálculos de variables de diseño propuestos por [11], se realizaron en base a las necesidades de disminución de contenido de humedad en los granos de cacao. Los contenidos iniciales de humedad en cada secador pueden observarse en "Fig.11". Se estableció un contenido final de humedad de 7% para el cálculo de las variables de diseño en los prototipos de Secador Solar A y B, ya que corresponde al valor sugerido por [3].

Los calores totales requeridos para llevar a cabo la disminución del contenido de humedad en los granos de cacao fueron de 17.8 y 15.6 MJ para los prototipos de Secador Solar A y B, respectivamente. El aumento necesario de temperatura promedio de la cámara de secado sobre la temperatura ambiental fue de 5.2 °C, para ambos casos. Los volúmenes de aire total necesarios a través de los sistemas fueron de 474.0 y 846.5 m^3 para los prototipos de Secador Solar A y B. En base al volumen de aire requerido y el tiempo de secado, los flujos volumétricos de aire requeridos fueron de 0.001 y 0.002 m^3/s para los prototipos de Secador Solar A y B, respectivamente.

Los cálculos de variables de operación del sistema de secado fueron realizados en base a los contenidos de humedad y las temperaturas medidas durante el proceso de secado. Los cálculos de flujo volumétrico, flujo másico, volumen y calor total transferido se realizaron solamente para el prototipo de Secador Solar B.

El calor total aportado en el sistema del prototipo de Secador Solar B fue de 74.5 MJ. Este valor representa casi cinco veces el calor requerido por las condiciones del sistema para llevar a cabo el secado de 18kg de granos de cacao fermentados. El volumen de aire a través del sistema fue de 28875.1 m^3, superando la cantidad de aire requerida por el sistema. El flujo volumétrico y el flujo másico fueron de 0.067 m^3/s y 0.078 kg/s, respectivamente.

Los aumentos de temperatura promedio medidos en los prototipos de Secador Solar A y B fueron de 3.8 y 2.2°C respectivamente. Ambos valores se encuentran por debajo del aumento de temperatura sugerido por [12]. Esto afecta el secado de manera que en los periodos donde la diferencia de temperatura es mínima, el flujo de calor no es suficiente para la evaporación de la masa de agua en los granos de cacao.

Las eficiencias calculadas de los sistemas de secado fueron de 26.74 y 22.82% para los prototipos A y B. Los consumos específicos de energía en los sistemas A y B fue de 2.35 y 2.75 kWh/kg respectivamente.

Las capacidades de secado, obtenidas experimentalmente, fueron de 9.97, 9.09 y 1.50 kg/m^2 para el Secador Solar A, Secador Solar B y Secador Invernadero, respectivamente.

El Secador Solar A mostró una mayor eficiencia que el Secador Solar B debido a que alcanzó un menor contenido de humedad en los granos de cacao, durante el mismo periodo. Adicionalmente, el Secador Solar A, mostró un menor consumo específico de energía, al utilizar solamente un ventilador, mientras que el Secador Solar B utilizó dos ventiladores.

IV. CONCLUSIONES

El objetivo del estudio fue evaluar el funcionamiento de un prototipo de secador solar de cacao tipo mixto de circulación inducida en la comunidad de Cilico Creek, comarca Ngäbe Buglé. La evaluación consistió en dos partes. Primero, compararon las temperaturas y contenido de humedad en los granos de cacao en tres diferentes secadores solares, durante un periodo de secado de cinco días. Segundo, se calcularon las variables de diseño y operación en el Secador Solar B, objeto sujeto a evaluación.

Los resultados mostraron que la humedad final en los granos de cacao del Secador Solar B se encontró por encima del rango sugerido por [3], mientras que las humedades de los granos de cacao en el Secador Solar A y el Secador Invernadero sí cumplieron dentro de los valores en el rango sugerido. Las temperaturas máximas en los Secadores A y B superaron el límite máximo recomendado, medida en la posición de la salida de colector solar. Sin embargo, las temperaturas en el centro de la cámara de secado se mantuvieron dentro del límite, en los Secadores A y B.

El aumento promedio de temperatura del Secador Solar B fue menor al aumento promedio necesario para el secado, sugerido por [11]. Por otro lado, el calor total suministrado al sistema fue superior al calor total necesario para el secado de los granos de cacao. El volumen de aire a través del sistema del excedió igualmente el volumen de aire necesario. Por último, la capacidad del Secador Solar B fue mayor a la del Secador Invernadero, pero menor a la del Secador Solar A.

Basado en los resultados de este estudio, la operación del Secador Solar B cumplió con las variables de diseño, con excepción al aumento promedio de temperatura sobre la temperatura ambiental. Se recomienda realizar pruebas de secado con ventiladores a velocidades inferiores a 3 m/s, debido a que el volumen total de aire a través del sistema excedió considerablemente el volumen requerido. Por otro lado, se recomienda implementar el uso de fuentes auxiliares de calor sensible para mantener la temperatura de la cámara de secado en periodos nocturnos y/o de poca radiación y bajas temperaturas. El estudio demostró que el prototipo de Secador Solar B posee una mayor capacidad de secado con respecto al Secador Invernadero. Esto, junto con la protección que ofrece el sistema contra agentes exteriores, representa una ventaja sobre el método implementado en la comunidad. Al mejorar los resultados experimentales e incorporar evaluaciones estadísticas y económicas, se mejoraría la productividad y calidad del cacao en la comunidad de Cilico Creek, a partir del uso de estas tecnologías de energía renovable.

V. AGRADECIMEINTOS

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento a través del proyecto IDDSE19-012. Al personal del Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI) por el apoyo en las actividades realizadas. A los miembros de la Cooperativa Solary R.L. por el apoyo y el espacio otorgado para realizar las pruebas experimentales de secado. A Darla Calderón, Constantino Gollini y Abelardo Franco por el apoyo en las actividades realizadas. Al Centro Regional de Bocas del Toro de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) por el apoyo en transporte, personal e instrumentos. Al Laboratorio de Ensayos de Materiales y Suelo (LEMS) por el apoyo en instrumentos, equipos y espacio para realizar la experimentación. Al Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP) por el apoyo en logística y al Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA) por el apoyo en la etapa de fermentación del cacao.

VI. REFERENCIAS

[1] Observatorio del Cacao, “Origen y cultivo del cacao natural.” http://www.observatoriodelcacao.com/origen/

[2] Barry Callebaut, “Theobroma cacao, the food of the gods.” https://www.barry-callebaut.com/es-MX/group/media/press-kit/theobroma-cacao-food-gods

[3] H. Aguilar, “Manual para la Evaluación de la Calidad del Grano de Cacao,” *Cent. Comun. Agrícola*, no. 19, pp. 12–14, 2016, [Online]. Available: http://www.fhia.org.hn/dowloads/cacao_pdfs/Manual_para_la_Evaluacion_de_la_Calidad_del_Grano_de_Cacao.pdf.

[4] Municipios y distritos de Panamá, “Jirondai en la region de Ngäbe-Buglé.” https://www.distrito.com.pa/distrito-jirondai.html#

[5] NASA, “POWER | Data Access Viewer Prediction of Worldwide Energy Resource.” https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

[6] J. Yenque D. and N. Cancino V., “Tipos de Secadores Solares,” *Industrial Data*, vol. 4, no. 2. p. 91, 2014, doi: 10.15381/idata.v4i2.6776.

[7] S. Vijayan, T. V. Arjunan, and A. Kumar, “Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 36, pp. 59–67, 2016, doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.014.

[8] D. Ortiz, J. Bastidas, J. Acosta, Ruales Carlos Frank, and C. Herrera, “Implementación de un secador de cacao a pequeña escala para disminuir el tiempo de secado y conservar las propiedades organolépticas en el Consejo Comunitario Las Varas Tumaco (Nariño),” vol. 2, pp. 1–9, 2019.

[9] C. A. Komolafe, M. A. Waheed, S. I. Kuye, B. A. Adewumi, and A. O. Daniel Adejumo, “Thermodynamic analysis of forced convective solar drying of cocoa with black coated sensible thermal storage material,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, no. June, p. 101140, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101140.

[10] ISO, “ISO 2292:2017 Cocoa beans — Sampling,” 2017. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2292:ed-2:v1:en

[11] Y. Qiu, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, X. Luo, and Q. Yu, “Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 225–235, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.016.

[12] F. K. Forson, M. A. A. Nazha, F. O. Akuffo, and H. Rajakaruna, “Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2306–2319, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.12.003.

[13] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, 8va edición. México: Mc Graw Hill, 2015.

[14] J. P. Ekka, K. Bala, P. Muthukumar, and D. K. Kanaujiya, “Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (Kaempferia parviflora) using two successive air mass flow rates,” *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 55–66, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.035.

Biochar and its role to improve digestibility conditions in biogas production

Joisleen Ramírez Salado
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
joisleen.ramirez@utp.ac.pa

Arthur James Rivas
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
arthur.james@utp.ac.pa

Euclides Deago
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH)
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
euclides.deago@utp.ac.pa

***Abstract*— Anaerobic digestion (AD) is a process that occurs in the limited presence of oxygen. This process results in products such as biogas and a watery mass rich in microorganisms known as digestate. Biogas is a biofuel composed mainly of methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2), and trace gases such as hydrogen sulfide (H_2S). Obtaining this gas occurs through different stages and biochemical transformations. These are classified as hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis. During this process, parameters such as temperature, organic load, and pH must be regulated to improve the production of methane, which makes up most of the biogas. Therefore, the objective of this literature review is to investigate the state of the art of the implementation of biochar in the improvement of digestion conditions in biogas generation systems. It has been shown that biochar could improve methane production by regulating the pH of the mixture to be digested. However, this is not due to the pH level of the biochar itself but to its chemical composition and the amount of ash, it contains. Other studies have determined that the particle size of the biochar also plays a role in the capacity to improve methane production, i.e., small particles shorten the retention time and increase methane production. In addition, in processes contaminated with ammonium, it maintains the pH stable at 6.0. This could demonstrate that biochar is able to increase the methane production rate during the anaerobic digestion process.**

Keywords—anaerobic digestion, biochar, pH, methane, biogas

I. INTRODUCTION

Biomass is all matter produced by plants (like rice husk, sugar cane, among other), animals (manure, chicken manure), and microbial organisms present in the environment [1]. It comprises macroelements C, H, O, N, P, and S in approximately 96%. In addition, it contains other elements such as Ca, Na, K, Cl, Mg, and Fe, which represent 3.9%, and trace elements Cu, Zn, Mn, Co, Mo, Ni, Se, and Si, which make up 0.1% [1]. Biomass has a high energy content that comes from the sun. The sunlight is transformed into chemical energy in the photosynthesis process by a molecule called chlorophyll, found in plants. This chemical energy is stored as organic matter. Living organisms that feed on this biomass can transform it and generate residual biomass [1]. Using these biomasses to generate fuels/energy (solid, liquid, or gaseous) can be done by combustion, thermochemical treatments such as gasification, pyrolysis, and hydrothermal carbonization for the production of bioenergy and products such as synthesis gas, biochar, bio-oil, and tar. It can also be used for biological decomposition processes both in the presence of oxygen and without oxygen to obtain biogas [1], [2].

In Panama City, until 2015, 70 tons/day of residual biomass, such as sewage sludge, was generated during the rainy season. While, in the dry season, up to 100 tons/day of this sludge is developed. According to estimates, this figure could have doubled by 2020. This sludge is transported to the Cerro Patacón landfill in Panama City [3]. This transport has become a waste management problem for the government due to the large amounts deposited. The transportation of sludge implies an additional economic cost for the wastewater treatment plant (WWTP). Therefore, alternatives for the use of sludge have been proposed.

One of the alternatives proposed is the use of the organic sludge as inoculum in anaerobic co-digestion for biogas generation. However, according to scientific literature, this process presents specific difficulties due to the possible acidification of the material to be digested. Thus, it could decrease biogas production since a neutral or near-neutral pH is needed to promote the growth of methanogenic bacteria [4]. A suitable pH range should remain between 6.7 to 8.4 to ensure optimal biogas production performance [5]. Other authors point out that an optimal pH range is between 6.2 to 7.2 [6]. Therefore, several authors have proposed using different types of biochar to regulate the changes in pH. This is because biochar can have basic pH [7] that could help to correct the pH of digestion and improve methane production [8]–[10].

Following the above and within the framework of project IDDSE19-008, "*Anaerobic co-digestion of wastewater biosolids and municipal organic waste as a sustainable energy alternative*" the objective of this literature review is to investigate the state of the art of the implementation of biochar in improving the of digestibility conditions in biogas generation systems.

II. METHODOLOGY

The presented literature review considers the most relevant data published related to the use of biochar in biogas production. Different biochar production methods were evaluated, and the correlation of their properties with the benefits of their use in biomass digestibility. Biomass type and the application method were validated as contributors of the quality and properties of the biogas. In addition, the effects of the biochar in different stages of the aerobic digestion process were evaluated in the published data. Finally, the operational parameters effect of biogas production and quality for different studies was addressed. Methane in biogas was targeted as the main product of digestion. Despite the benefits of biochar in anaerobic digestion for biogas production, a

National Secretariat of Science, Technology, and Innovation (SENACYT).

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00082

limited number of works have been published in the last five years, as shown in fig 1.

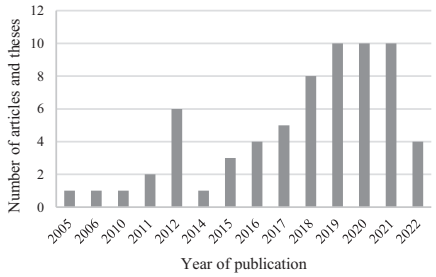


Fig 1. The number of articles and theses related to biochar as an amendment in biochar production per publication year.

III. TECHNOLOGIES FOR BIOCHAR PRODUCTION

Biochar is a carbonaceous material, the product of the thermal or thermochemical conversion of biomass. The chemical composition of biochar depends on the type of biomass used. It also depends on the treatment or technology applied for its conversion [7]. There are different technologies for producing biochar [10], such as pyrolysis, gasification, and torrefaction, among others. Some of them are described below:

A. Pyrolysis

Pyrolysis is a thermal process that occurs in the presence of limited or no oxygen [11]–[13]. It occurs in a temperature range of 300 °C to 900 °C. Solid, liquid, and gaseous products can be obtained from this process: biochar, bio-oil, and a mixture of gases, known as syngas, respectively [11], [14]. Pyrolysis can be divided into two processes, slow and fast pyrolysis, which depend on the rate at which the treatment temperature increases [13]. Biochar produced through pyrolysis technology can be used as an improver of the anaerobic digestion process. This is because it increases methane production rate and maintains pH levels close to neutral pH. In addition, it prevents pH fluctuation, i.e., mitigating an acidic environment. Therefore, it helps to maintain a stable process. This was proven by several studies [8], [9], [15]. This effect of biochar on codigestion has been attributed to its ability to enhance and facilitate electrical connections for direct interspecies electron transfer (DIET) in co-cultures. [15], [16].

B. Gasification

Another process by which biomass can be transformed is the thermochemical treatment of gasification. This process consists of converting raw material, either solid or liquid, into a gas which, when burned, releases energy [17]. The main difference between combustion and gasification is that combustion breaks chemical bonds to release stored energy. Gasification adds energy to the chemical bonds of the product [18]. From this process, gaseous products can be obtained, such as synthesis gas or syngas, liquid products such as tar and bio-oil, and solid products such as biochar and ashes. This process presents a biomass conversion productivity between 5% to 10% depending on the production method. This is because this type of treatment is mainly used for a gas generation but not biochar production [11]. Top-lit updraft gasification has been proven to be a method to produce a relatively high yield (up to 33%) of biochar from gasification [17], [19]. Q. Qi et al. [20] used a gasification technology in a fixed bed gasifier to produce biochar as a substrate in the anaerobic digestion process.

C. Torrefaction

Torrefaction is a process that has been used for thousands of years. It was long removed from making tea and coffee, but it has gained relevance for biochar production in recent years. It can be described as a thermal process where biomass is heated slowly and for an extended residence time in the absence of oxygen. The torrefaction process removes moisture and volatiles from the material. This occurs to avoid a reaction of carbonization and degradation of the biomass in excess. During this process, the decomposition of hemicellulose is the main target [21]. It is performed in a temperature range between 200°C and 300°C and a time that can last up to 2 hours [22]. Dudek et al. [10] improved this technology for biochar generation and applied it to enhance anaerobic digestion. They pointed out that the biogas production rate increased by adding a dose of biochar < 8%.

IV. EFFECTS OF BIOCHAR DURING THE STAGES OF THE ANAEROBIC DIGESTION PROCESS

Biological decomposition can occur in the presence of oxygen as well as in the presence of limited or no oxygen. In this section, particular emphasis is placed on biological decomposition processes without oxygen or anaerobic decomposition. This process gives, as products, a mixture of gases composed mainly of methane (CH4), carbon dioxide (CO2) [23] and traces of hydrogen sulfide (H2S) [24]. This gas mixture is known as biogas. In addition, the process generates a sludge or aqueous mass rich in microorganisms that can carry out the degradation of organic matter [23]–[25].

Biogas is a biofuel obtained through various biomasses and production technologies. Anaerobic digestion is one of the most widely used since it generates two valuable products, biogas, and mass rich in microorganisms [24], [26]. This process contributes to the efforts to counteract or control the consequences of greenhouse gases. However, the composition of biogas is not totally free of these gases. However, they do not contribute to global warming and the climate crisis. The methane generated in AD can be burned or used with little impact to the environment since its CO_2 emission is lower than that produced by coal [24]. In addition, this type of process is being performed in companies to implement a circular economy, contributing positively to Sustainable Development Goals, such as Clean Water and Sanitation (6), Affordable and Non-Polluting Energy (7), Responsible Production and Consumption (12), Climate Action (13) [27]. Thus, they contribute to reducing gas emissions and the complete or semi-complete utilization of the waste produced for the generation of fuels and/or nutrient-rich substrates [26]. The production of this gas occurs through different stages and biochemical transformations. These are classified into hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis [4], [6], [28].

- Hydrolysis

The hydrolytic stage is limited or affected when the organic matter is agglomerated rather than dissolved. Therefore, the rate of the process is disturbed [4], [28], [29]. In addition, the rate also depends on the process temperature, the acidity or alkalinity of the mixture, the hydraulic retention

time (HRT), composition and particle size of the substrate, and methane concentration, among others [4], [28]. Therefore, different authors have used biochar to accelerate the hydrolysis process and increase methane production efficiency. This is because biochar shortens the lag phase [30] and maintains a pH range close to neutral pH, which provides an optimal environment for the growth of bacteria and microorganisms [31]–[33].

Shi et al. [31] determined that biochar stimulates hydrolysis early in the AD process. In this study, they used oily sludge with low bioavailability and high toxicity, which decreases the efficiency of the hydrolysis phase. However, the efficiency at the beginning of the process in the samples with biochar reached 56.7%, while the control samples reported a yield of 34.5%. Furthermore, they concluded that these production efficiencies of biogas were obtained because biochar contains components that promote hydrolysis by activating hydrolases. Yang & Wang [32] also concluded that the increased hydrolysis is due to hydrolase. In this line, Ma et al. [33], in their study determined that the use of biochar can accelerate the hydrolysis and methanogenesis stage. In addition, they pointed out that adding biochar increases the activity of acidifying bacteria instead of hydrolytic bacteria at the middle of the test period.

- Acidogenesis stage

Using biochar in the anaerobic digestion process also accelerates and helps the acidogenesis stage. This was proved by Pan et al. [34] in their research, where they demonstrated that biochar could improve cell growth and accelerate their co-metabolism in anaerobic digestion. Therefore, it is inferred that biochar could be an essential product for the acceleration and improvement of hydrolysis, acidogenesis, and acetogenesis in the process of anaerobic digestion [34]–[36]. On the other hand, biochar helps to inhibit the drop of pH levels in environments with a high organic load during the process of acidogenesis. Thus, it acts as a stabilizing agent in AD [30].

- Acetogenic stage

The acetogenic bacteria are fundamental in the methanogenesis stage since they metabolize the acids, increasing the pH of the medium. The presence of methanogenic bacteria in this phase is also essential, as they remove H2 from the medium. This ensures that the rate of methanogenesis is not affected by H2 pressure [4]. Shen et al. [37] studied redox-active biochar with distinctive electrochemical properties to promote methane production in the anaerobic digestion of waste-activated sludge. It showed that biochar presents better results during the acetogenic and methanogenic stages. On the other hand, one study reported that adding biochar decreased the pH level in the acetogenic stage. However, the pH increased over time, providing a suitable environment for bacterial growth [38]. Adding biochar improves the conversion of volatile fatty acid (VFA) to acetic acid during the acetogenic process. In addition, it enhances the removal or processing of organic matter from the medium [39]. It was reported that adding biochar improved the generation of VFA in hydrogen production and aided their degradation during methane production [40].

- Methanogenic stage

During this stage, more than 70% of methane is produced by transforming acetate or acetic acid [28], [29]. The pH is considered an important parameter during the methanogenic stage of AD. This is because it promotes microbial growth and discards VFA [39]. One study [41] mentioned that biochar facilitates the methanogenesis stage by providing electron transfer between sympatric anaerobes. Ma et al. [30] found that rice husk biochar improved the methane production rate by 25%, using a biochar ratio of 15 g/L. Another study also reported accelerating the methane production rate in the methanogenesis phase by adding biochar to the anaerobic digestion process [33]. However, methane production can be inhibited with the addition of high doses of biochar since the pH tends to decrease and volatile fatty acids accumulate, exceeding the buffering capacity of the system [30].

In their research, Wang et al. [37] evaluated the use of biochar at different pyrolysis temperatures (500, 600, and 730 °C) using Douglas-fir as feedstock. The biomass digested was sewage sludge at three different digestion temperatures (25 °C, 37 °C, and 55 °C). In this study, they generated biochar at temperatures of 500 °C and 600 °C, which improved methane production and yield in the 25 °C and 37 °C digestions. At the same time, the 730 °C biochar presented better results in the 55 °C digestion [42]. Therefore, it has been possible to prove that biochar is positively involved during the methanogenesis stage. However, this depends on its Redox activity, specifically on its electron-donating capacity and not on its conductivity.

V. Effects of Biochar on Operational Parameters and Control of Production and Quality of Methane in Biogas Generation

Like many processes, anaerobic digestion has parameters that must be regulated and controlled. These parameters are listed below,

A. Temperature

The anaerobic digestion process is temperature dependent. This is because the higher the digestion temperature, the faster the growth rate of microorganisms and bacteria inside the digester. This leads to an increase in biogas production [28], [43]. There are three temperature ranges at which the digestion process can be carried out. The psychrophilic range (temperatures below 25 °C), mesophilic range (between 25 °C to 45 °C), and thermophilic range (temperatures between 45°C to 65°C) [43]. A study [44] evaluating the influence of temperature change on the anaerobic digestion process showed that the temperature increase does not affect methane production inmediatly. However, they found that a progressive increase of more than 15°C can reduce methane production. In addition, they mentioned that the pH of the digestate can increase due to a temperature rise. However, the pH level did not exceed a value of 8. This pH change was obtained by increasing the temperature by 5 °C, 10 °C and 15 °C from a base temperature of 36 °C. On the other hand, Romero-Güiza et al. [45] in their study where they use WWTP sludge and crude glycerin to be co-digested, highlighted that, in the mesophilic temperature range, the pH tends to decrease. As a result, it would be necessary to increase the pH so that CH_4 production is not affected [4]. Jang et al. [46] reported an increase in methane production rate when using dry manure biochar, with a particle size between 420-600 μm. The biochar was added at two doses (1 g/L and 10 g/L), varying the digestion temperature (20 °C, 35 °C, and 55 °C). When the control

groups and samples with biochar (10 g/L) were compared at different digestion temperatures, they showed that the latter reached a methane production rate of 24.31, 37.35, and 38.49 mL CH4/dgVS removed at 20, 35, and 55 °C, respectively.

Another study [47] reported that biochar at mesophilic temperatures increases methane production and promotes VFA degradation. This happens at biochar doses < 25 g/L, as the biochar sample at 50 g/L decreased methane production. At thermophilic temperatures, biochar improves the methane production rate with increasing organic load and reduces the lag in methane production compared to the control sample [48]. However, thedelayed methane production phase is lower at temperatures > 35 °C [49]. Sun et al. [50] evaluated mesophilic and thermophilic temperature with biochar aggregates, where they obtained similar results to previous studies [47], [48]. Biochar aggregates of 2, 6, 10 and 14 g/L were used. The thermophilic temperature presented better results in methane production (10873 mL/d). At the same time, 9564 mL/d was achieved under mesophilic temperature. This indicates that temperature influences methane production. However, biochar could further improve biogas production compared to control samples (6275 mL/d and 8331 mL/d for mesophilic and thermophilic conditions) [50].

B. Organic Load

The organic loading rate affects biogas production in anaerobic digestion. This parameter is involved in the digestion process's stability and the reactor's design (digester) [51]. Feng et al. [52] determined that methane production increased when the organic loading rate was 1.9 g/L.day and pH was set at 6.0 and 4.5, an experiment based on mixed acid and lactic acid fermentation, respectively, of food waste. Methane production increased from 380 ml/g (single-stage control) to 460 and 482 ml/g for the two-stage AD, using a pH of 6.0 and 4.5, respectively. Similar results were obtained by Jiang et al. [53] in their study. He showed that a dose between 0.75 and 9.00 g VS/L.day of organic loading improved the stability of the anaerobic digestion system. With a 7.5 gVS/L.day loading, the system recorded the maximum performance in biogas production, generating 495 and 544 mL/gVS under mesophilic and thermophilic conditions, respectively. Due to the above, positive results have been obtained in using biochar to improve methane production with a high organic loading rate. For example, one study [54] evaluated the performance of biochar addition in a system with a high organic rate of 6.0 gVS/L.day for a long-term period of 365 days. This study obtained positive results regarding biogas production since biochar promoted biomethanation in a high organic rate system and generated a stable environment. While the control system only supported a rate of 2.70 gVS/L.day. From that concentration, methane production and pH gradually decreased.

Another study [53] demonstrated that adding biochar improves the methanogenic stage at lower inoculation proportions (1% - 4 % v/v). While at the highest inoculation (10 % v/v), it did not register a significant improvement. This could indicate that the improvements in methane production are not due to the initial increases in the organic loading rate (inoculum). Dudek et al. [10] used torrefaction technology to generate biochar. This product was used to improve the anaerobic digestion process, where they reported an increase in biogas production (of 92.3 mL/g to 122.0 mL/g for 0% and 5% of biochar like adittive) and reaction rate (k) (of 1.535 k/d to 1.893 k/d for 0% and 5% of biochar like adittive).

C. pH

pH control is critical for biogas generation in anaerobic digestion. System stability is achieved by stabilizing the pH. If the pH level is acidic, the growth of methanogenic bacteria is inhibited. Whereas an alkaline pH causes biogas production to stop as microbial granules are disintegrated [4]. Vongvichiankul et al. [55] in their study, obtained that pH presented a relationship between the concentration of VFA and the type of fermentation. These parameters were directly involved in biogas production. However, they did not perform analyses to determine the types of bacteria in the biomass used for the study. In another article, it was shown that pH affects biogas production. This was tested by adjusting the pH of the mixture at three different levels to 7, 8, and 9 in various tests during the first four days of the process. The substrate and inoculum (0.5:1) and pH adjusted at 7.0, obtaining higher biogas production [56]. On the other hand, a study reported that adding biochar to the anaerobic digestion decreased pH during the first eight days. However, after this period, the pH increased until the end of the process, reporting a level close to 7.5 [57]. Another study [36] showed that using biochar improves the adsorption of inhibitors and decreases the acidification of the process since it manages to increase and maintain the pH at a level close to neutrality. Ma et al. [30] reported that adding rice husk biochar to the DA process of high-load sorghum increased the pH of the process keeping it close to neutrality. In addition, it decreased the variation of pH levels during the reaction time.

VI. USE OF BIOCHAR TO IMPROVE METHANE PRODUCTION IN ANAEROBIC DIGESTION

In recent years, the study of technologies for waste management has increased. One of these technologies is biochar production since different biomasses can be used for generation. Therefore, this study emphasizes using biochar to improve parameters such as pH and methane production during anaerobic digestion. Several studies have shown that its use in anaerobic digestion increases methane production and maintains a pH close to neutrality [8], [15], [58] (see Table I). In addition, it has been shown that it can maintain pH at optimal levels for bacterial growth (pH $\approx$ 7.0) [8], [9], [15]. For example, Codignole et al. [58] demonstrated that biochar generated by the slow pyrolysis process presented better surface area, pore volume, electrical conductivity, and cation exchange capacity (CEC) compared to the gasification process.

However, Shi et al. [31] mentioned that excess biochar in the mixtures decreases the efficiency of the methanogenic stage and increases the dormancy period. Another study highlighted the negative impact of using high doses of biochar since it can slow down the dormancy phase and inhibit biogas production [59]. However, with an adequate amount of biochar, the lag phase can be reduced by 45% of the time, which could accelerate the anaerobic digestion process. This was revealed by a study using rice husk biochar with a dosage of 15 g/L [30]. In another study, a dose of 1 and 10 g/L of dry manure biochar was reported to decreased the lag phases of AD and improved methane production [46]. By using different doses of biochar from spent bran or brewery spent grain (produced through torrefaction) in the anaerobic digestion of the same biomass, Dudek et al. [10] observed that high doses of biochar, from8% to 50% can decrease methane production. It was inferred that this was due to the Maillard reaction. This reaction occurs during the

TABLE I. USE OF BIOCHAR FOR PH LEVEL CONTROL AND METHANE PRODUCTION

Digested Biomass	Digestion process size	Biomass for biochar production	Production technology	Characteristics of the anaerobic digestion process	Digestion temperature	pH	Methane production (CH_4)	Reference
Food waste	Batch (1.1 L bottles)	Fruit woods	Pyrolysis (800-900 °C)	- The pH of the biochar was 8.63, and the pH of the digestion was adjusted to 7.0 at the beginning of the process. -Hydrochloric acid and sodium hydroxide solutions were used to regulate the pH.	Mesophilic (35 °C)	After the application of biochar, the pH of the samples tends to increase and stay around 6.5 and 7.0. At the same time, the control sample tends to decrease with time.	The samples with biochar maintained production of more than 400 mL/g of methane. At the same time, the control sample generated 37.9 mL/g.	[15]
Acidified sewage sludge	Batch (160 ml bottles)	Blend pine, spruce, and cedar.	Pyrolysis (450-550 °C)	- The pH of biochar was 8.1. - The pH of the substrate sludge was 5.54. The mixed sludge had a pH of 5.40. On the other hand, the inoculum showed a pH of 7.55. - The dose of biochar ranged from 0.2 - 3.7 g/g-VSubstrate.	Mesophilic (38 °C)	The pH was maintained at a level of 7.711 and 7.715. This provides a suitable environment for bacterial growth.	Samples with biochar content (with particle size <0.075 mm) presented higher methane production (552 mL/g-VS) at a dosage of 1 g/g-TSinoculum).	[8]
Food waste	Batch (120 ml bottles)	Wheat bran	Pyrolysis (800 °C)	- The pH of the digestion was adjusted to 7.5 at the beginning of the process. - Sodium bicarbonate was used to regulate the pH. - The dose of biochar used was 1.25 g.	Mesophilic (20 °C)	- The pH remained stable between 7.0 and 7.5.	Methane production remained between 92-110 % until day 99 in samples with biochar. However, these values were obtained in the control samples similarly. From day 155, the models with biochar show a stable methane generation.	[9]
		Wood	Pyrolysis (500 °C)					
		Vegetable Garden	Pyrolysis (800 °C)					
Anaerobic granular sludge obtained from the wastewater of a paper mill.	Batch	Fruit woods	Pyrolysis (800-900 °C)	- The pH of the biochar was 8.63. - The pH of the digestion was adjusted to 7.0 at the beginning of the process. - The larger particle size biochar showed better performance for acid inhibition relief. -The methane production rate (with larger particle size) was lower than the smaller particle size biochar.	Mesophilic (35 °C)	- The larger biochar at 7g-N/L ammonium subjection maintained the pH around 6. Whereas the larger-sized biochar at 3.5 g-N/L ammonium subjection held the pH at 5.3.	The pores of the biochar are positively involved in methane production, as they can harbor methanogenic cells, which facilitates stable methane production in an ammonium-stressed environment.	[64]
Seeding sludge	Semi-continuous reactors (0.5 L)	Wood chips	Fixed bed gasification (700, 800, 900 °C) with inlet gas at 300 mL/min flow rate.	- Manual stirring was used for the reactors every day for 15 min. - Each digester was fed with 3.2 g/L/day of ethanol.	Mesophilic (36 °C)	-In the first days of the study, pH decreased to 5.5, and acetic acid accumulated at a higher rate. The sample with biochar at 900 °C had the most acidic pH. -After 23 days of digestion, pH increased to 7.0 and remained neutral because acetic acid decreased.	- During the first five days of the study, methane production was inhibited in different samples with biochar at 900, 800, and 700 °C, respectively. However, from day ten onwards, the models showed increased methane production as acetic acid decreased. - The sample with biochar at 900 °C presented better stability in methane generation than the sample with biochar at 800 °C.	[20]

thermal process between sugars and amino acids, resulting in the generation of melanoidins, a substance known to be challenging to process in anaerobic environments.

Fagbohungbe et al. [60] mentioned that biochar can improve the anaerobic digestion (AD) process. This is because it neutralizes substrate-induced inhibition. On the other hand, it enhances the quality of the digestate produced by AD since it increases the retention of nutrients. Studies have shown that applying this digestate to soils improves their fertility and the availability of nutrients for crop growth [61], [62]. Mixing biochar and digestate could improve soils' physical and chemical properties [61]. In addition, the combination of substrate and biochar could act as a circular economy system [63], contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs). The pH of biochar is generally basic, ranging from 7.0 to 10.5 [63]. Another study showed a pH above ten could be achieved by carbonizing organic sludge from a WWTP in a gasifier [7]. However, the pH level of the biochar is not directly involved in pH neutralization in anaerobic digestion. It is estimated that it depends more on the biochar's ash content and chemical composition [8]. Improvements in anaerobic digestion using biochar are also obtained using activated carbon. However, biochar production is cost-effective and contributes to the circular economy by improving waste management. Additionally, biochar is a product that does not need to be recovered after use [60], which could contribute to the composition of digestate to be used as fertilizer in soils [36], [54], [61].

Another study [65] has shown that using biochar from agricultural waste in the anaerobic digestion of swine waste in a semi-continuous reactor using mesophilic temperature increases methane production compared to control reactors (without added biochar). This behavior was identified as being due to the chemical composition of the biochar. In addition, the pH and alkalinity of the system were maintained at optimal levels for the development of the process and kept the system in equilibrium. Zhang et al. [66] obtained similar results in their study using food waste biochar.

Cimon et al. [8] indicated that biochar in anaerobic digestion with particle size < 0.075 mm presented lower retention and methane production rates. This is compared to larger particle sizes. However, Lü et al. [64] in their study on ammonium and acid stress relief using biochar, showed that a particle size between 2 to 5 mm presented a better performance in keeping the pH of the AD stable at 6.0. This is when having an ammonium concentration of 7 g/L.

Another study [66] reported that biochar-enriched samples showed an increase in the methane production rate. In this work, they evaluated the biochar particle size, concluding that there was no difference (in methane production) between particles with a height of 50 µm - 1 cm. On the other hand, particles with a particle size between 1 - 3 cm showed significant differences ($p < 0.05$), i.e., methane production was lower with this particle size. This was associated with the flotation of large biochar particles.

In their research, Sunyoto et al. [38] used biochar in the AD of aqueous carbohydrate food waste for H2 production and CH4 generation in the project's second phase. For the first phase, they initially set the pH to 5, and the digestion was carried out at 35 °C. The maximum H_2 production rate increased by 32.5% compared to the control samples. While, for the CH_4 generation phase, with an initial pH of 7.0 at the same temperature, there was an increase in the production rate by 41.6%. In addition, it shortened the lag phase in both periods for H_2 and CH_4 generation.

CONCLUSION

This study investigated the state of the art of implementing biochar to improve digestion conditions in biogas generation systems. With the information presented in this work, it can be concluded that using biochar positively favors anaerobic digestion. Because it increases the methane production rate, it maintains a pH close to neutral, which is a suitable environment for developing bacteria and methanogenic microorganisms. In addition, it shortens the time of the "lag" phase, i.e., methane is obtained in less time compared to the control samples investigated. Moreover, it improves the conversion of volatile fatty acids (VFA) to acetic acid. It also enhances methane production when the system has high organic loading rates. However, studies have shown that adding high amounts of biochar to the AD process could cause a decrease in methane production or even shut down the system. Therefore, low proportions or rates of biochar should be considered.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the National Secretariat of Science, Technology and Innovation (SENACYT) for its financial contribution to this work, which is part of Project IDDSE19-008 "Anaerobic co-digestion of biosolids from wastewater and municipal organic waste as a sustainable energy alternative". In addition, the authors thank the National Research System (SNI) of the Republic of Panama for the partial financial support and the Center for Multidisciplinary Studies in Science, Engineering and Technology AIP (CEMCIT-AIP) for the administrative management during the execution phase of the project.

REFERENCES

[1] J. Fernández González *et al.*, *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. 2015.

[2] K. Qian, A. Kumar, H. Zhang, D. Bellmer, and R. Huhnke, "Recent advances in utilization of biochar," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1055–1064, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.074.

[3] G. Martínez *et al.*, "Programa de Saneamiento de la Ciudad y la Bahía de Panamá II PN-L1109," Panamá, 2015.

[4] A. Brahim, "DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS, GANADEROS Y LODOS DE DEPURADORA," Universidad de Málaga, Málaga, 2017. [Online]. Available: http://orcid.org/0000-0003-2263-0639

[5] G. Rekleitis, K.-J. Haralambous, M. Loizidou, and K. Aravossis, "Utilization of Agricultural and Livestock Waste in Anaerobic Digestion (A.D): Applying the Biorefinery Concept in a Circular Economy," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 17, p. 4428, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13174428.

[6] K. Hagos, J. Zong, D. Li, C. Liu, and X. Lu, "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1485–1496, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.184.

[7] G. Sánchez, J. Ramírez, A. James, E. Deago, and J. Villarreal, "Evaluación del potencial de lodos orgánicos carbonizados de una planta de tratamiento de aguas residuales para el mejoramiento de suelos," *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, pp. 292–299, Jun. 2021, doi: 10.33412/apanac.2021.3198.

[8] C. Cimon, P. Kadota, and C. Eskicioglu, "Effect of biochar and wood ash amendment on biochemical methane production of wastewater sludge from a temperature phase anaerobic digestion process," *Bioresour Technol*, vol. 297, p. 122440, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122440.

[9] C. Cruz Viggi *et al.*, "Enhancing methane production from food waste fermentate using biochar: the added value of electrochemical testing in pre-selecting the most effective type of

biochar," *Biotechnol Biofuels*, vol. 10, no. 1, p. 303, Dec. 2017, doi: 10.1186/s13068-017-0994-7.

[10] Dudek, Świechowski, Manczarski, Koziel, and Białowiec, "The Effect of Biochar Addition on the Biogas Production Kinetics from the Anaerobic Digestion of Brewers' Spent Grain," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, p. 1518, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081518.

[11] J. S. Cha *et al.*, "Production and utilization of biochar: A review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 40, pp. 1–15, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.JIEC.2016.06.002.

[12] A. Khitab *et al.*, "Production of Biochar and Its Potential Application in Cementitious Composites," *Crystals 2021, Vol. 11, Page 527*, vol. 11, no. 5, p. 527, May 2021, doi: 10.3390/CRYST11050527.

[13] L. Fryda and R. Visser, "Biochar for Soil Improvement: Evaluation of Biochar from Gasification and Slow Pyrolysis," *Agriculture (Switzerland)*, vol. 5, no. 4, pp. 1076–1115, Dec. 2015, doi: 10.3390/AGRICULTURE5041076.

[14] J. S. C. Muñoz and A. C. M. Benavides, "Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible," *Producción + limpia*, vol. 5, no. 2, pp. 79–95, 2010.

[15] J. Cai, P. He, Y. Wang, L. Shao, and F. Lü, "Effects and optimization of the use of biochar in anaerobic digestion of food wastes," *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 34, no. 5, pp. 409–416, May 2016, doi: 10.1177/0734242X16634196.

[16] P. Zhang, S. Zheng, J. Liu, B. Wang, F. Liu, and Y. Feng, "Surface properties of activated sludge-derived biochar determine the facilitating effects on Geobacter co-cultures," *Water Res*, vol. 142, pp. 441–451, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.watres.2018.05.058.

[17] A. James, "Simultaneous Biochar and Syngas Production in a Top-Lit Updraft Biomass Gasifier," North Carolina State University, 2015.

[18] P. Basu, "Gasification Theory," *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, pp. 211–262, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812992-0.00007-8.

[19] R. A. M. James, W. Yuan, and M. D. Boyette, "The effect of biomass physical properties on top-lit updraft gasification of woodchips," *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 4, p. 283, 2016, doi: 10.3390/en9040283.

[20] Q. Qi *et al.*, "Enhancement of methanogenic performance by gasification biochar on anaerobic digestion," *Bioresour Technol*, vol. 330, p. 124993, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.124993.

[21] P. Basu, "Torrefaction," *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, pp. 93–154, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812992-0.00004-2.

[22] D. Wang, P. Jiang, H. Zhang, and W. Yuan, "Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 723, p. 137775, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.137775.

[23] Y. Acosta Lorenzo and M. C. Obaaya Abreu, "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I," *ICIDCA*, vol. XXXIX, no. 1, pp. 35–48, 2005.

[24] B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar, S. Chozhavendhan, and J. Iyyappan, "RETRACTED: Biogas production–A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 570–582, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.093.

[25] G. Kiss and G. Aguilar, "Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final," *Gaceta Ecológica*, vol. 79, pp. 39–51, 2006, [Online]. Available: http://estudiosterritoriales.org/resumen.oa?id=53907903

[26] P. G. Kougias and I. Angelidaki, "Biogas and its opportunities—A review," *Front Environ Sci Eng*, vol. 12, no. 3, p. 14, Jun. 2018, doi: 10.1007/s11783-018-1037-8.

[27] G. Mota Botello and D. Mora Izquierdo, "La FAO y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible," *"Patrimonio": Economía Cultural Y Educación Para La Paz (Mec-Edupaz)*, vol. 2, no. 14, pp. 100–117, 2018.

[28] A. Bernal Martínez, G. I. González López, and G. Cuevas Rodríguez, "Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos," in *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos*, ECORFAN, 2020, pp. 115–141. doi: 10.35429/H.2020.8.115.141.

[29] L. E. González Rodríguez, "EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROPECUARIOS," Universidad Veracruzana, Veracruz, 2015.

[30] H. Ma, Y. Hu, T. Kobayashi, and K.-Q. Xu, "The role of rice husk biochar addition in anaerobic digestion for sweet sorghum under high loading condition," *Biotechnology Reports*, vol. 27, p. e00515, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.btre.2020.e00515.

[31] Y. Shi, M. Liu, J. Li, Y. Yao, J. Tang, and Q. Niu, "The dosage-effect of biochar on anaerobic digestion under the suppression of oily sludge: Performance variation, microbial community succession and potential detoxification mechanisms," *J Hazard Mater*, vol. 421, p. 126819, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126819.

[32] G. Yang and J. Wang, "Synergistic enhancement of biohydrogen production from grass fermentation using biochar combined with zero-valent iron nanoparticles," *Fuel*, vol. 251, pp. 420–427, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.059.

[33] J. Ma, J. Pan, L. Qiu, Q. Wang, and Z. Zhang, "Biochar triggering multipath methanogenesis and subdued propionic acid accumulation during semi-continuous anaerobic digestion," *Bioresour Technol*, vol. 293, p. 122026, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122026.

[34] J. Pan, J. Ma, X. Liu, L. Zhai, X. Ouyang, and H. Liu, "Effects of different types of biochar on the anaerobic digestion of chicken manure," *Bioresour Technol*, vol. 275, pp. 258–265, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.068.

[35] Z. bin Khalid, Md. N. I. Siddique, A. Nayeem, T. M. Adyel, S. bin Ismail, and M. Z. Ibrahim, "Biochar application as sustainable precursors for enhanced anaerobic digestion: A systematic review," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 4, p. 105489, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105489.

[36] I. Saif *et al.*, "Biochar assisted anaerobic digestion for biomethane production: Microbial symbiosis and electron transfer," *J Environ Chem Eng*, vol. 10, no. 3, p. 107960, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.107960.

[37] Y. Shen *et al.*, "Role of redox-active biochar with distinctive electrochemical properties to promote methane production in anaerobic digestion of waste activated sludge," *J Clean Prod*, vol. 278, p. 123212, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123212.

[38] J. Pan, J. Ma, L. Zhai, and H. Liu, "Enhanced methane production and syntrophic connection between microorganisms during semi-continuous anaerobic digestion of chicken manure by adding biochar," *J Clean Prod*, vol. 240, p. 118178, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118178.

[39] B. Sharma and S. Suthar, "Enriched biogas and biofertilizer production from Eichhornia weed biomass in cow dung biochar-amended anaerobic digestion system," *Environ Technol Innov*, vol. 21, p. 101201, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.eti.2020.101201.

[40] N. M. S. Sunyoto, M. Zhu, Z. Zhang, and D. Zhang, "Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste," *Bioresour Technol*, vol. 219, pp. 29–36, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.089.

[41] M. O. Fagbohungbe, B. M. J. Herbert, L. Hurst, H. Li, S. Q. Usmani, and K. T. Semple, "Impact of biochar on the anaerobic digestion of citrus peel waste," *Bioresour Technol*, vol. 216, pp. 142–149, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.04.106.

[42] P. Wang *et al.*, "Enhancement of biogas production from wastewater sludge via anaerobic digestion assisted with biochar amendment," *Bioresour Technol*, vol. 309, p. 123368, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123368.

[43] M. T. Varnero Moreno, "MANUAL DE BIOGÁS," Chile, 2011. Accessed: May 13, 2022. [Online]. Available: https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf

[44] S. Önen Cinar and K. Kuchta, "EVALUATION OF TEMPERATURE CHANGES IN ANAEROBIC DIGESTION PROCESS," *Detritus*, vol. 10, no. 10, pp. 11–18, Mar. 2020, doi: 10.31025/2611-4135/2020.13911.

[45] M. S. Romero-Güiza, L. Pereira, X. Tomas, J. Palatsi, P. Icaran, and V. M. Monsalvo, "Assessment of hyper-thermophilic/mesophilic temperature-phased anaerobic co-digestion of crude glycerine and sewage sludge," *Fuel*, vol. 289, p. 119956, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119956.

[46] H. M. Jang, Y.-K. Choi, and E. Kan, "Effects of dairy manure-derived biochar on psychrophilic, mesophilic and thermophilic anaerobic digestions of dairy manure," *Bioresour Technol*, vol. 250, pp. 927–931, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.11.074.

[47] Y. Cui, F. Mao, J. Zhang, Y. He, Y. W. Tong, and Y. Peng, "Biochar enhanced high-solid mesophilic anaerobic digestion of food waste: Cell viability and methanogenic pathways," *Chemosphere*, vol. 272, p. 129863, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129863.

[48] Q. Li, M. Xu, G. Wang, R. Chen, W. Qiao, and X. Wang, "Biochar assisted thermophilic co-digestion of food waste and waste

activated sludge under high feedstock to seed sludge ratio in batch experiment," *Bioresour Technol*, vol. 249, pp. 1009–1016, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.11.002.

[49] P. Bres, "Optimización de la digestión anaeróbica del guano de aves ponedoras," 2019.

[50] C. Sun *et al.*, "Feasibility of dry anaerobic digestion of beer lees for methane production and biochar enhanced performance at mesophilic and thermophilic temperature," *Bioresour Technol*, vol. 276, pp. 65–73, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.105.

[51] R. Nkuna, A. Roopnarain, C. Rashama, and R. Adeleke, "Insights into organic loading rates of anaerobic digestion for biogas production: a review," *Crit Rev Biotechnol*, vol. 42, no. 4, pp. 1–21, Jul. 2021, doi: 10.1080/07388551.2021.1942778.

[52] K. Feng *et al.*, "Effect of fermentation type regulation using alkaline addition on two-phase anaerobic digestion of food waste at different organic load rates," *Renew Energy*, vol. 154, pp. 385–393, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.03.051.

[53] J. Jiang *et al.*, "Effect of Organic Loading Rate and Temperature on the Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: Process Performance and Energy Recovery," *Front Energy Res*, vol. 8, May 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.00089.

[54] A. S. Giwa *et al.*, "Effect of biochar on reactor performance and methane generation during the anaerobic digestion of food waste treatment at long-run operations," *J Environ Chem Eng*, vol. 7, no. 4, p. 103067, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103067.

[55] C. Vongvichiankul, J. Deebao, and W. Khongnakorn, "Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and Biogas Production in Mesophilic Screw Anaerobic Digester," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 877–882, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.113.

[56] M. Keramati and H. Beiki, "The effect of pH adjustment together with different substrate to inoculum ratios on biogas production from sugar beet wastes in an anaerobic digester," *Research Article Journal of Energy Management and Technology (JEMT)*, vol. 1, p. 6, 2017, doi: 10.22109/jemt.2017.87623.1016.

[57] B. Wu *et al.*, "Evaluating the effect of biochar on mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge and microbial diversity," *Bioresour Technol*, vol. 294, p. 122235, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122235.

[58] F. Codignole Luz, S. Cordiner, A. Manni, V. Mulone, and V. Rocco, "Biochar characteristics and early applications in anaerobic digestion-a review," *J Environ Chem Eng*, vol. 6, no. 2, pp. 2892–2909, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.04.015.

[59] D. Li *et al.*, "Accelerated bio-methane production rate in thermophilic digestion of cardboard with appropriate biochar: Dose-response kinetic assays, hybrid synergistic mechanism, and microbial networks analysis," *Bioresour Technol*, vol. 290, p. 121782, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121782.

[60] M. O. Fagbohungbe *et al.*, "The challenges of anaerobic digestion and the role of biochar in optimizing anaerobic digestion," *Waste Management*, vol. 61, pp. 236–249, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.11.028.

[61] M. E. Lee, M. W. Steiman, and S. K. st. Angelo, "Biogas digestate as a renewable fertilizer: effects of digestate application on crop growth and nutrient composition," *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 173–181, Apr. 2021, doi: 10.1017/S1742170520000186.

[62] M. Samoraj *et al.*, "The challenges and perspectives for anaerobic digestion of animal waste and fertilizer application of the digestate," *Chemosphere*, vol. 295, p. 133799, May 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133799.

[63] T. Ngo, E. Shahsavari, K. Shah, A. Surapaneni, and A. S. Ball, "Improving bioenergy production in anaerobic digestion systems utilising chicken manure via pyrolysed biochar additives: A review," *Fuel*, vol. 316, p. 123374, May 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123374.

[64] F. Lü, C. Luo, L. Shao, and P. He, "Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching Methanosaeta and then Methanosarcina," *Water Res*, vol. 90, pp. 34–43, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.watres.2015.12.029.

[65] E. Sánchez, C. Herrmann, W. Maja, and R. Borja, "Effect of organic loading rate on the anaerobic digestion of swine waste with biochar addition," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 29, pp. 38455–38465, Aug. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13428-1.

[66] L. Zhang *et al.*, "Biochar enhanced thermophilic anaerobic digestion of food waste: Focusing on biochar particle size, microbial community analysis and pilot-scale application," *Energy Convers Manag*, vol. 209, p. 112654, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112654.

Proposal for the use of the multicriteria decision method (AHP) for the selection of risk mitigation projects

Diana Ng
Docente Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
diana.ng@utp.ac.pa
ORCID: 0000-0003-3791-2575

Luis Blanco.
Docente Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
luis.blanco@utp.ac.pa
ORCID: 0000-0003-0904-8599

Vanesa Peñalba Achurra
Docente Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
vanesa.penalba@utp.ac.pa
ORCID: 0000-0003-4801-7031

***Resumen* – Los proyectos destinados a la mitigación de las situaciones de emergencia debido a los desastres naturales, toman cada vez más relevancia y esto se debe a los efectos que genera, año tras año, el cambio climático a nivel mundial, situación de la cual no escapa Panamá. Este artículo propone una metodología de análisis multicriterio para la priorización de proyectos que disminuyan el riesgo de la población ante las Emergencias Nacionales.**

Palabras Claves - Análisis multicriterio, protocolo de acción temprana, AHP.

***Abstract* – Projects aimed at mitigating emergency situations due to natural disasters are becoming increasingly relevant and this is due to the effects generated, year after year, by global climate change, a situation from which Panama does not escape. This article proposes a multi-criteria analysis methodology for prioritizing projects that reduce the population's risk in National Emergencies.**

Key words - Multicriteria analysis, Early Action Protocol, AHP.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha movilizado esfuerzos individuales a esfuerzos globales, debido al impacto que genera a nivel mundial. Este no solo afecta a los países de primer mundo, sino a todos independientemente del desarrollo económico. El cambio climático afecta, de forma directa o indirecta, la calidad de vida de las personas, mediante las consecuencias que se perciben en la salud, afectaciones en viviendas y en la capacidad de producción de alimentos[1].

Basadas en sus consecuencias, el cambio climático es un aspecto que se incluye, hoy en día, en planes de desarrollo gubernamental, estos enfocados en la disminución de su impacto. Por su parte, Panamá no escapa de esta realidad y ha incluido dentro de las políticas públicas esfuerzos para mitigar el impacto del cambio climático. Por ello en el 2015 se crea el Ministerio de Ambiente, mediante la Ley N° 8 del 25 de marzo [2]. Si bien es cierto, la creación del Ministerio es un paso esencial para establecer políticas y procesos que lleven a la resiliencia por parte de los efectos del cambio climático, es importante destacar que Panamá cuenta con una Ley de Descentralización. Esto obliga a los municipios a competir por fondos para el desarrollo de diversos proyectos. Adicionalmente, Panamá cuenta con el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), cuya misión es promover planes para la prevención y mitigación ante emergencias nacionales [3], así como también con una "Guía Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres en Panamá"[4].

Cabe destacar que los efectos del cambio climático afectan las tendencias del clima seco y húmedo de Panamá, haciendo que las lluvias y las sequías sean más intensas y extendidas, así como las elevaciones del nivel del mar, tanto en el Atlántico como en el Pacífico [2]. Trayendo como consecuencias pérdidas de cultivos, afectaciones en la disponibilidad del agua potable, inundaciones, deslizamientos de tierras, mayor demanda de energía eléctrica, daños en infraestructuras, entre otras. Esto hace que la población más vulnerable sean las personas en estado de pobreza debido a la desigualdad de condiciones.

Debido al sin número de afectaciones que se dan por los cambios en el comportamiento de las temporadas en Panamá, y a la competencia y burocracia para la obtención de recursos (económicos) traen consigo una dificultad en la toma de decisiones en cuanto a proyectos de interés social que permitan disminuir el riesgo poblacional ante una emergencia.

En este trabajo se propone una metodología estructurada basada en análisis multicriterio, que permita ayudar a priorizar los diferentes proyectos destinados a una acción temprana ante el surgimiento de Emergencias Nacionales.

II. MARCO CONCEPTUAL

2.1 *Protocolo de Acción Temprana*

El Protocolo de Acción Temprana es el "plan" que guía la implementación oportuna de las actividades de acción temprana y se basa en un pronóstico meteorológico o climático claro y combina pronóstico basado en impacto. Cada Protocolo de Acción Temprana se refiere a un peligro; sin embargo, una Sociedad Nacional puede desarrollar múltiples Protocolos de

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00083

Acción Temprana que cubran una variedad de peligros diferentes.

El marco de tiempo requerido para desarrollar un Protocolo de Acción Temprana depende de qué tan rápido el gobierno pueda avanzar a través de los pasos de la metodología de Financiamiento Basado en Pronósticos (incluyendo el estudio de factibilidad, el análisis de riesgo, el inventario de pronósticos, el desarrollo desencadenante y la selección de acciones tempranas). Un proceso integral de Financiamiento basado en Pronósticos puede demorar entre 12 y 36 meses en completarse [5].

Un elemento clave de la Acción basada en Pronósticos (FbA por sus siglas en ingles) son los fondos garantizados para las actividades de preparación anual, el stock preposicionado y luego las actividades de acción temprana, una vez que se alcanza el disparador [5].

2.2 *Análisis de Decisión Multicriterio*

Los métodos multicriterio nacen en el campo de las ciencias de la decisión [6], [7]. Sus ideas pioneras fueron desarrolladas por otros investigadores, culminando estos esfuerzos en la primera Conferencia Mundial sobre Toma de Decisiones Multicriterio (Multiple Criterial Decision Making), que se celebró en Estados Unidos en octubre de 1972 en la Universidad de Carolina del Norte. Tal acontecimiento puede considerarse el nacimiento del paradigma multicriterio, así como el comienzo de un nuevo período de ciencia normal en el campo de la ciencia de las decisiones.

Un problema multicriterio tiene como características que existen al menos dos criterios en conflicto, y que existan al menos dos alternativas de solución. Establecen un enfoque de gran potencialidad cuando la decisión se centra en optimizar más de un objetivo lo cal a su vez debe satisfacer un conjunto de restricciones [6]. No obstante, para lograr un enfoque multicriterio fiable se requiere que los resultados sean científicamente rigurosos que puedan utilizarse como criterios de orientación para los responsables de la toma de decisiones [8].

El objetivo de la Toma de Decisiones Multicriterio es el de encontrar la alternativa que más desea o prefiere el decisor. Lo ideal sería tener una alternativa que fuese más preferida o indiferente en cada uno de los criterios que cualquier otra alternativa posible, ya que, en ese caso, la buscada sería esta. El problema va a estar en que los criterios están en conflicto, lo cual implica que cuando se está mejorando uno de los criterios, al menos se esta empeorando otro (u otros), haciendo imposible que exista dicha alternativa [9].

Existen ciertos elementos comunes en todo problema multicriterio. Entre los que podemos destacar los siguientes: la definición de los criterios, la definición de la matriz de decisión o evaluación de los criterios para cada alternativa y la asignación de los pesos a los diferentes criterios. Estos elementos se muestran en la Fig. 1.

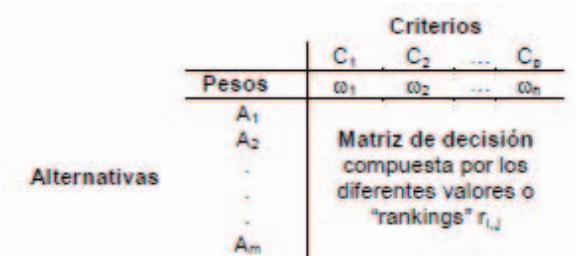


Fig. 1. Matriz de un modelo de decisión multicriterio

2.2.1 *Método de Decisión Multicriterio AHP*

Para aplicar el método AHP no hace falta contar con información cuantitativa sobre el resultado que alcanza cada alternativa en cada uno de los criterios considerados, sino tan sólo los juicios de valor de la persona que tome las decisiones. Para llevar a cabo el proceso se tienen que realizar los siguientes pasos: (i) sumar los valores de cada columna de la matriz de comparaciones pareadas; (ii) dividir cada elemento de la matriz entre el total de su columna, y (iii) calcular el promedio de los elementos de cada línea de las prioridades.

La matriz comparaciones pareadas es una matriz cuadrada ya que compara las alternativas entre sí, aislando los criterios establecidos uno por uno. Esto con el fin de obtener los vectores de prioridades de cada criterio estudiado. A continuación, la matriz de comparaciones pareadas (ver Fig. 2).

$$A=\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

Fig 2: Matriz de comparaciones

Teniendo la matriz se procede a sumar verticalmente los elementos de cada columna (ver Fig. 3):

$$v_i = \sum_{1}^{m} a_i \quad donde \ i = 1, \dots, n$$

Fig 3: Suma de cada columna

Una vez obtenida la suma de cada columna, dividimos cada elemento de la matriz entre la suma obtenida, para conseguir la matriz normalizada (ver Fig. 4):

$$A_{\text{normalizada}} = \begin{pmatrix} 1/v1 & a_{12}/v2 & \cdots & a_{1n}/vn \\ a_{21}/v1 & 1/v2 & \cdots & a_{2n}/vn \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}/v1 & a_{n2}/v2 & \cdots & 1/vn \end{pmatrix}$$

Fig. 4. Matriz de comparaciones normalizada

El tercer paso consiste en obtener las prioridades de la matriz de comparaciones a partir de la matriz normalizada (ver Fig. 5). En este punto se realiza el promedio de las filas, obteniendo el vector de prioridades de los criterios (ver Fig. 6) [10]

$$p_j = \begin{pmatrix} \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} a_{1j} \\ \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} a_{2j} \\ \vdots \\ \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} a_{nj} \end{pmatrix}$$

Fig 5 . Proceso para la realización del vector de prioridades

$$p_1 = \begin{pmatrix} p_{c11} \\ p_{c12} \\ \vdots \\ p_{c1n} \end{pmatrix}$$

Fig 6. Vector de prioridades de los criterios (Criterio 1)

Se puede comprobar que la suma de los elementos del vector prioridades debe ser igual a 1.

Las prioridades de las alternativas se obtienen mediante la construcción de las matrices que contengan las prioridades de las alternativas respecto de los criterios-subcriterios (ver Fig. 7):

$$\begin{array}{c} \\ \text{Alternativa 1} \\ \text{Alternativa 2} \\ \cdots \\ \text{Alternativa } n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{Criterio 1} & \text{Criterio 2} & \cdots & \text{Criterio 3} \end{array} \\ \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{pmatrix} \end{array}$$

Fig.7. Prioridades de las alternativas respecto de los criterios-subcriterios

En caso de que se tenga subcriterios, las matrices obtenidas se multiplican con las matrices de los vectores de prioridades de los subcriterios respecto al criterio de jerarquía superior (ver Fig. 8):

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{c11} \\ p_{c12} \\ \vdots \\ p_{c1n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p'_{11} \\ p'_{12} \\ \vdots \\ p'_{1n} \end{pmatrix}$$

Fig 8. Matrices de los vectores de prioridades de los subcriterios

Posteriormente, el proceso se repite hasta terminar todas las comparaciones de los elementos del modelo (criterios, subcriterios y alternativas)[10].

2.3 *Medidas de adaptación al cambio climático realizadas en Costa Rica.*

El cambio climático es uno de los principales desafíos de esta generación e implica fuertes impactos en sistemas humanos y naturales a nivel global. El aumento en la temperatura media ya ha generado cambios evidentes en los patrones de lluvia y en la intensificación de eventos climáticos, entre otros. En el caso de Costa Rica se registraron pérdidas entre los años 1998 y 2008 en infraestructura, servicios y sectores productivos debido a eventos hidrometeorológicos (lluvias intensas y sequías).

Las proyecciones para el año 2025 indicaban que el costo de la atención de los eventos hidrometeorológicos y climáticos extremos podría llegar a abarcar entre 0.68% y 1.05% del producto interno bruto (PIB) en un escenario conservador, y entre 1.64% y 2.50% del PIB en un escenario de mayor riesgo. Por lo cual el país tomó acciones preventivas y aumentó su resiliencia ante el cambio climático por medio de la implementación de medidas de adaptación.

Dichas medidas de adaptación corresponden a aquellas acciones e intervenciones públicas o privadas que buscan reducir condiciones de vulnerabilidad; moderar y evitar daños; y aprovechar oportunidades para potenciar la resiliencia de comunidades frente a los efectos e impactos de la variabilidad y el cambio climático, por medio de la modificación de las condiciones internas de los sistemas humanos y naturales que propagan el riesgo. Para estas situaciones Costa Rica desarrolló una guía para la toma de decisiones de las diferentes acciones e intervenciones utilizando los métodos de decisiones multicriterio [11].

III. METODOLOGÍA PROPUESTA

El objetivo de este trabajo es el de desarrollar una metodología basada en análisis multicriterio AHP para la priorización en la selección de proyectos que ayuden a la mitigación de riesgos en caso de emergencias nacionales. Debemos resaltar que el análisis multicriterio ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de riesgos asociados a amenazas naturales[12]

Este trabajo parte del supuesto de que existe información básica sobre proyecciones a corto, mediano y largo plazo de las afectaciones climáticas en el territorio nacional (Panamá). También se toma como supuesto que los proyectos para la mitigación del impacto climático son definidos por expertos mediante estudios previos. Es importante mencionar que dentro del trabajo se toma en consideración clústeres los cuales pueden ser regiones, comunidades, municipios, etc.

Adicionalmente, se centra en pasos utilizados en las medidas de adaptación al cambio climático estipulados en la Guía desarrollada por Costa Rica [11], siendo adaptadas y modificadas al entorno panameño utilizando específicamente el método AHP ver Fig. 9.

Fig. 9. Pasos establecidos para la selección de alternativas.

El paso 1, inicia con la definición del objetivo general. Aun y cuando se esté utilizando la metodología para la mitigación del impacto climático, se debe establecer un objetivo SMART, centrándose en el clúster de estudio. Esto con el fin de servir de guía en cuanto a la definición de los criterios.

El segundo paso se basa en la selección de criterios de evaluación. Hay consideraciones importantes a tomar en cuenta: 1. Los criterios deben estar alineados con el o los objetivos propuestos. 2. Deben ser establecidos por diversos actores (expertos en el tema ambiental, gubernamental, construcción de ser necesario, entre otros) todo esto con el fin de asegurar diferentes perspectivas ante el desarrollo de los posibles proyectos a seleccionar. 3. Los criterios deben ser independientes, cuantificables y no redundantes. 4. Asegurar que los criterios entren dentro de los ámbitos mostrados en la Tabla I. Estos ámbitos son establecidos mediante los tipos de vulnerabilidades descritos en la "Guía Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres en Panamá" y la cantidad de ámbitos escogidos dependerán de los expertos.

TABLA 1. EJEMPLOS DE CRITERIOS PARA LOS AMBITOS ESTABLECIDOS

Ámbitos	*Medidas*
Físico	• Asegura las infraestructuras existentes (comerciales, personales, educativas, etc) • Mejora la calidad de las infraestructuras existentes • Resulta beneficioso para las infraestructuras socioeconómica (hidroeléctricas, carreteras, acueductos, etc)
Ambiental y Ecológico	• Asegura la protección de recursos naturales • Permite la restauración de ecosistemas • Protege la biodiversidad existente
Económica	• Genera recursos económicos • Resulta tener un buen costo-beneficio • Reduce costos operativos del clúster (municipio)
Social	• Reduce desigualdades existentes • Mejora la calidad de vida • Incentiva la participación ciudadana
Educativa	• Asegura conocimiento de prevención ante amenazas • Mejora la preparación ante desastres naturales • Permite a la población crear planes ante situaciones de peligro
Cultural	• Preserva el patrimonio cultural • Incentiva la participación de las personas de diferentes creencias • Asegura una buena reacción ante el peligro
Política e Institucional	• Se alinea al plan estratégico nacional • Mejora la gobernanza • Se alinea a la visión del municipio (o clúster)
Ciencia y tecnología	• Se alinea a conocimientos técnicos utilizados previamente • Permite modificaciones para mejorar la seguridad • Se implementa a corto, mediano o largo plazo

El tercer paso considera la asignación de pesos a los criterios. Con el fin de establecer pesos a las preferencias del decisor minimizando la subjetividad, se utiliza el proceso de comparaciones pareadas definido por Saaty [13] y mencionado en la sección previa.

El cuarto paso establece los niveles de evaluación de cada uno de los criterios. En este punto se pueden tener variables totalmente cuantitativas. Por ejemplo, peso, talla, cantidades, dinero, etc. También es importante establecer si estos son mejor entre mayor o menor sea el valor, esto con el fin de poder normalizar la matriz de decisión de la mejor manera y evitar confusiones entre los tomadores de decisiones.

Por otro lado, se tienen las variables que son cualitativas en este caso pueden ser: bajo, medio, alto, corto, largo, etc. En este caso habrá que definir sus diferentes niveles y luego se sugiere utilizar nuevamente las comparaciones pareadas de Saaty [13] a fin de minimizar la subjetividad en la asignación de los valores.

El quinto paso es establecer las prioridades de las alternativas. Esto realizando una matriz final con las matrices que contengan las prioridades de las alternativas respecto a los criterios establecidos. De esta manera se asigna una evaluación final a las alternativas de proyectos estipulados.

El último paso, paso 6, está enfocado en la validación de los resultados. Si bien es cierto el método propuesto basado en el AHP, establece de forma cuantitativa las prioridades para facilitar la toma de decisiones al requerir inversión ya sea nacional o extranjera, antes de tomar la decisión definitiva es

recomendable una validación. Esto incluyendo más actores, trayendo consigo mayores perspectivas a la toma de decisión.

IV. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO

En la actualidad el concepto de cambio climático no pasa desapercibido a nivel mundial, y esto se debe al cambio del comportamiento habitual de las temporadas o estaciones, creando fenómenos climáticos cada vez más catastróficos. Esto ha llevado a los diferentes países a trabajar en base a la vulnerabilidad existente para mitigar los desastres y riesgos causados por los mismos.

Este trabajo, ha sido enfocado en alternativas de prevención para la mitigación del impacto en las temporadas secas y lluviosas en Panamá a consecuencia del cambio climático, no en las acciones correctivas. Para esto el gobierno ya tiene una hoja de ruta establecida para dar respuesta en un periodo de 72 horas después de la emergencia.

Debido a la necesidad de tener procesos y metodologías científicas al momento de la toma de decisiones con el fin de asignar recursos, se ha propuesto la metodología basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Siendo este un método flexible y fácil de comprender dando objetividad al proceso de elección por parte de los tomadores de decisiones.

Queda por resolver algunos elementos dentro del trabajo propuesto, la primera validar la metodología establecida utilizándola en casos de estudios reales en la República de Panamá. Adicionalmente, se debe contemplar el índice de consistencia una vez se establezcan las matrices al momento de la toma de decisiones. Otro elemento que considerar es la automatización del método para facilitar los resultados de forma inmediata al momento de realizar el proceso de selección de las alternativas.

REFERENCIAS

[1] "Causas y efectos del cambio climático | Naciones Unidas," 2022. [Online]. Available: https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change.

[2] "Cambio Climático en Panamá – Dirección de Cambio Climático," 2022. [Online]. Available: https://dcc.miambiente.gob.pa/cambio-climatico-en-panama/.

[3] "Misión y Visión – Sinaproc," 2022. [Online]. Available: https://www.sinaproc.gob.pa/mision-y-vision/.

[4] SINAPROC, "Guia Municipal de Gestion de Riesgo de Desastres en Panama," vol. 1, no. 1, pp. 1–50, 2020.

[5] La federación internacional de sociedades de la cruz roja y de la media luna roja (ficr), "Práctico información para las sociedades nacionales sobre para financiamiento basado en ecast y para la acción del dr ef basada en ecast," 2021.

[6] C. Romero, *Decisiones Multicriterio*. 1996.

[7] Sergio Barba-Romero;Pomerol, "Decision Multicriterio," p. 52, 1997.

[8] D. Spyridi, C. Vlachokostas, A. V. Michailidou, C. Sioutas, and N. Moussiopoulos, "Strategic planning for climate change mitigation and adaptation: the case of Greece," *Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag.*, vol. 7, no. 3, pp. 375–393, 2014.

[9] E. Martínez, *"Evaluación y Decisión Multicriterio. Reflexiones y Experiencia",* Universida. 1998.

[10] S. a Berumen and F. L. Redondo, "a Utilidad De Los Métodos De De Competitividad Creciente *," vol. 20, no. 34, pp. 65–87, 2007.

[11] D. de C. C. del M. de A. y E. de C. Rica, "Guía para la priorización de medidas de adaptación al cambio climático utilizando el Método de Análisis Multicriterio," no. 3, 2021.

[12] A. Valagussa, P. Frattini, G. B. Crosta, D. Spizzichino, G. Leoni, and C. Margottini, "Hazard ranking of the UNESCO world heritage sites (WHSs) in Europe by multicriteria analysis," *J. Cult. Herit. Manag. Sustain. Dev.*, vol. 10, no. 4, pp. 359–374, 2020, doi: 10.1108/JCHMSD-03-2019-0023.

[13] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process—what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161–176, Jan. 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.

Modelamiento matemático de la solubilidad acuosa

2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)

Daniel Ricardo Delgado
Facultada de Ingeniería Civil
Universidad Cooperativa de Colombia
Neiva, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-4835-9739

Rossember Eden Cardenas-Torres
Facultad de Ciencias y Humanidades
Fundación Universidad de América
Bogotá, Colombia
https://orcid.org/0000-0003-4601-0602

Claudia Patricia Ortiz
Programa de Administración en Seguridad y Salud en el Trabajo
Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO
Neiva, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-7977-701X

***Abstract*—** Solubility is one of the most important physicochemical properties of a drug, since it is the basis for any technological development, as well as one of the most important information when carrying out environmental evaluations. In this work, the Apelblat, Buchowski-Ksiazczak, van't Hoff-Yaws, NRTL and Wilson models were evaluated in the prediction of the solubility of three drugs of environmental interest because they are considered hazardous xenobiotics for the environment by the Norman network. According to the evaluation of the quality of the adjustment by calculating the mean absolute percentage error (MAPE), it was established that all the models allow calculating the solubility of the three bioactive substances with very low error percentages, i.e. Apelblat 2.98%, van't Hoff-Yaws 2.97%, Buchowski-Ksiazczak 3.35%, NRTL 7.37% and Wilson is 10.88%, which indicates that the models can be an important tool for optimizing processes involving the solubility of these drugs..

Keywords—Drugs, mathematical models, Apelblat, Buchowski-Ksiazczak, van't Hoff-Yaws, NRTL, Wilson, solubility

***Resumen* —** La solubilidad es una de las propiedades fisicoquímicas más importantes de un fármaco, debido a que es la base para cualquier desarrollo tecnológico relacionado con el mismos, además de una de las informaciones más importantes a la hora de realizar evaluaciones ambientales. Es este trabajo se evaluaron los modelos de Apelblat, Buchowski-Ksiazczak, van't Hoff-Yaws, NRTL y Wilson en la predicción de la solubilidad de tres fármacos de interés medioambiental debido ser considerados xenobióticos peligrosos para el medio ambiente por la red Norman. De acuerdo a la evaluación de la calidad del ajuste mediante el cálculo del error porcentual medio absoluto (EPMA) se estableció que los todos los modelos permiten calcular la solubilidad de las tres sustancias bioactivas con porcentajes de error muy bajos, es decir Apelblat 2.98%, van't Hoff-Yaws 2.97%, Buchowski-Ksiazczak 3.35%, NRTL 7.37% y Wilson es de 10.88%, lo que indica que los modelos pueden ser una herramienta importante para optimizar procesos en donde se involucre la solubilidad de estos fármacos.

Palabras claves — Fármacos, modelos matemáticos, Apelblat, Buchowski-Ksiazczak, van't Hoff-Yaws, NRTL, Wilson, solubilidad.

I. INTRODUCCIÓN

La solubilidad acuosa es una de las propiedades fisicoquímicas más importantes de una sustancia, la solubilidad es relevante a la hora de evaluar el destino ambiental y el transporte de ingredientes farmacéuticos activos (IFA) en el medio ambiente [1-4]. IFAs solubles en agua, se disolverán fácilmente en agua si se derraman accidentalmente y tenderán a permanecer en solución acuosa hasta que se degraden. Por otro lado, las sustancias escasamente solubles se disuelven más lentamente y, cuando están en solución, tienen una mayor tendencia a separarse de la solución acuosa en otras fases, como suelos, lodos y la biota propia de los ecosistemas contaminados, por lo que parámetros relacionados con la solubilidad como el coeficiente de reparto son propiedades fisicoquímicas de gran importancia para evaluaciones ambientales [5].

Experimentalmente la determinación de la solubilidad en la mayoría de los casos no es un proceso complejo, sin embrago, implica el uso de diferentes solventes que en ocasiones son tóxicos y/o cancerígenos en cantidades considerables dependiendo de la técnica experimental utilizada [6].

Sumado a lo anterior el volumen de residuos puede llegar transformarse en un problema ambiental de no realizarse el tratamiento adecuado de estos desechos.

Por tanto, el desarrollo de modelos que permitan predecir la solubilidad de fármacos, puede reducir el número de ensayos experimentales haciendo los procesos experimentales más eficientes [7], si bien el objetivo del modelamiento es predecir la solubilidad de IFAs sin el uso de datos experimentales, la complejidad del fenómeno de la solubilidad hace que esta tarea sea dispendiosa, por lo que los modelos actuales permiten optimizar el proceso experimental y predecir la solubilidad una vez se tengan algunos datos de referencia.

Además, la capacidad de predecir esta propiedad es importante para el diseño de nuevos productos farmacéuticos cuya solubilidad puede predecirse antes de realizar la síntesis. En este orden de ideas, la solubilidad como teoría ha sido bien estudiada dado origen a algunas teorías sobre las interacciones moleculares soluto-solvente que establecen la base del conocimiento para la comprensión de la solubilidad [8]. Cabe destacar, que la solubilidad de IFAs actualmente es un área de investigación activa debido a la incapacidad de las teorías de explicar el fenómeno de forma general.

A continuación, se evaluarán varios modelos matemáticos propuestos, para determinar la solubilidad de algunos IFAs reportados poa la red Norman como xenobióticos de alta peligrosidad para ecosistemas acuáticos.

II. MODELOS MATEÁTCOS E IFAS DE INTERES AMBIENTAL

El vertimiento xenobióticos a los ecosistemas acuáticos es un problema de gran envergadura que ha venido creciendo debido a diferentes factores. En general se esperaría que la única fuente se debiera a los desechos generados en laboratorios de investigación y de análisis de calidad de centros de investigación y empresas farmacéuticas. Sin embargo, la disposición inadecuada de residuos hospitalarios, medicamentos no usados en los hogares y hasta medicamentos utilizados como drogas de abuso contribuyen de forma negativa al aumento de estos xenobióticos en ecosistemas acuáticos [2,9-11].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00084

Algunos fármacos reportados por la Red Norman, y que son de uso masivo son las sulfonamidas y los parabenos [12,13]. Las sulfonamidas son bacteriostáticos que actúan al interferir con la síntesis de ácido fólico en las bacterias, que es esencial para la formación de ácido nucleico y, en última instancia, de ADN y ARN, los parabenos son ésteres de ácido p-hidroxibenzoico que se utilizan como conservantes antimicrobianos en cosméticos, envases de alimentos y productos farmacéuticos.

Una de las sulfonamidas más utilizadas por la industria farmacéutica es la sulfametazina (SMT); y en cuanto a los parabenos más utilizados se encuentra el metil-parabeno y etil-parabeno (Figuras 1 y 2).

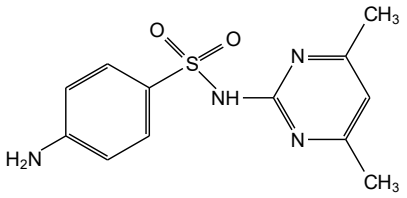


Fig. 1. Estructura molecular de la sulfametazina

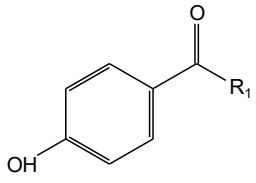


Fig. 2. Estructura molecular del metil-parabeno (R_1=CH_3), etil-parabeno (R_1= CH_2CH_3).

En cuanto a los modelos matemáticos más utilizados se encuentran:

A. Modelo de Apelblat

La ecuación de Apelblat es un modelo empírico ampliamente utilizado, que relaciona la solubilidad de la fracción molar del soluto con la temperatura, como se indica a continuación:

$$\ln x_3 = A + \frac{B}{T} + C \ln T \qquad (1)$$

donde A, B, C son parámetros del modelo. El valor C representa el efecto de la temperatura que influye en la entalpía de fusión, mientras que A y B describen la variación de los coeficientes de actividad en solución [14,15].

B. Modelo de Buchowski-Ksiazczak (ecuación λh)

Los datos de equilibrio sólido-líquido se pueden representar mediante la ecuación λh de dos parámetros, propuesta originalmente por Buchowski et al. [16]. La ecuación no utiliza coeficientes de actividad y se puede escribir de la siguiente manera:

$$\ln\left(1 + \lambda \frac{1-x_3}{x_3}\right) = \lambda h(T^{-1} - T_m^{-1}) \qquad (3)$$

Donde x_3 indica la fracción molar del soluto, T_m es la temperatura de fusión del soluto, λ y h son parámetros del modelo.

C. Modelo van't Hoff-Yaws

El modelo de van't Hoff y su extensión de tres parámetros de uso menos frecuente, van't Hoff–Yaws [17] son ecuaciones semiempíricas que correlacionan la solubilidad con la temperatura de la siguiente manera:

$$\ln x_3 = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \qquad (4)$$

donde A, B, C representa los parámetros del modelo.

D. Modelo de coeficiente de actividad de Wilson

La ecuación de Wilson se puede utilizar para determinar el coeficiente de actividad del soluto sólido a una dilución infinita. Esta ecuación consta de dos partes, una contribución combinatoria basada en la teoría de Flory y un término basado en el exceso de energía de Gibbs, que se puede escribir de la siguiente manera [18]:

$$\ln \gamma_3 = 1 - \ln(x_3 + x_2\Lambda_{32} + x_1\Lambda_{31}) - [(x_3(x_3 + x_2\Lambda_{32} + x_1\Lambda_{31})^{-1}) + (x_2\Lambda_{23}(x_3\Lambda_{23} + x_2 + x_1\Lambda_{21})^{-1}) + (x_1\Lambda_{13}(x_3\Lambda_{13} + x_2\Lambda_{12} + x_1)^{-1})] \qquad (5)$$

Donde γ_3 es el parámetro de actividad del soluto, x_3 es la fracción molar del soluto, x_2 es la fracción molar del solvente orgánico y x_1 es la fracción molar de agua o solvente más polar, Λ_{12}, Λ_{13}, Λ_{21}, Λ_{23}, Λ_{31} y Λ_{32} son los parámetros propios del modelo.

E. Modelo de coeficiente de actividad de dos líquidos no aleatorios (NRTL)

Con base en la ecuación de Wilson y el modelo de mezclas de dos líquidos de Scott, Renon y Prausnitz desarrollaron el modelo NRTL. Este modelo ha tenido bastante éxito en la correlación de una amplia variedad de sistemas. De acuerdo con el modelo NRTL, el coeficiente de actividad del soluto en la fase líquida podría calcularse mediante las siguientes ecuaciones

$$\ln \gamma_3 = (x_2\tau_{23}G_{23} + x_1\tau_{13}G_{13})(x_3 + x_2G_{23} + x_3G_{13})^{-1} - x_3(x_2\tau_{23}G_{23} + x_1\tau_{13}G_{13})(x_3 + x_2G_{23} + x_3G_{13})^{-2} + x_2G_{32}(x_3G_{32} + x_2 + x_1G_{12})^{-1}[\tau_{32} - (x_3\tau_{32}G_{32} + x_1\tau_{12}G_{12})(x_3G_{32} + x_2 + x_1G_{12})^{-1}] + x_1G_{31}(x_3G_{31} + x_2G_{21} + x_1)^{-1}[\tau_{31} - (x_3\tau_{31}G_{31} + x_2\tau_{21}G_{21})(x_3G_{31} + x_2G_{31} + x_1)^{-1}] \qquad (7)$$

Donde γ_3 es el parámetro de actividad del soluto, x_3 es la fracción molar del soluto, x_2 es la fracción molar del solvente orgánico y x_1 es la fracción molar de agua o solvente más polar, τ_{12}, τ_{13}, τ_{21}, τ_{23}, τ_{31}, τ_{32} G_{12}, G_{13}, G_{21}, G_{23}, G_{31}, y G_{32}son los parámetros propios del modelo[11].

Donde $G_{ij} = e^{-0.3\tau_{ij}}$

F. Modelo mnodificado de Wilson

Se emplea un modelo no lineal, denominado modelo de Wilson modificado, para representar los valores de solubilidad de los fármacos en los disolventes binarios a una temperatura dada.

$$-\ln x_{3,1+2} = 1 - w_1(1 + \ln x_{3,1})(w_1 + w_2\lambda_{12})^{-1} - w_2(1 + \ln x_{3,2})(w_2 + w_1\lambda_{21})^{-1} \qquad (7)$$

En donde $x_{3,1+3}$ es la solubilidad del fármaco en una mezcla cosolvente, $x_{3,1}$ es la solubilidad en el solvente orgánico o de

menor polaridad $x_{3,2}$ es solubilidad del fármaco en agua o solvent más polar, w_1 y w_2 son las fracciones másicas del solvent orgánico y el agua libre de solute respectivamente y λ_{12} y λ_{21} son parámetros propios del Sistema [11].

III. Materiales y Métodos.

A partir de datos experimentales de solubilidad en sistemas cosolventes reportados en literatura, se desafían algunos modelos matemáticos utilizando Python, específicamente la librería SolubilityModels [19], desarrollada por el grupo de investigación. Una vez desafiado cada modelo, los resultados fueron evaluados en relación al error porcentual medio absoluto entre el dato teórico y el experimental.

IV. Resultados y Discución.

A partir de los datos de solubilidad de metil-parabeno y etil-parabeno en acetonitrilo agua, publicados por Romero-Nieto et al [20,21] (Figuras 3 y 4) se evaluaron los modelos matemáticos de Apelblat, Buchowski-Ksiazczak y van't Hoff-Yaws los cuales predicen la solubilidad de los IFAs en función de la temperatura, utilizando la librería de Python SolubilityModels 1.8.0 [19].

Un claro ejemplo de las dificultades que se deben afrontar en el modelamiento matemático es la solubilidad del metil y etil parabeno en mezclas cosolventes MeCN+W, puesto que entre w_1=0.3 y w_1=0.75-0.80 se reporta separación de fases, un fenómeno que difícilmente se podría predecir mediante modelamiento matemático.

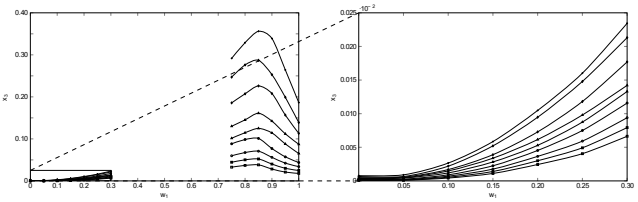


Fig. 3. Solubilidad experimental del metil-parabeno en mezclas cosolventes acetonitrilo + agua a diferentes temperaturas.

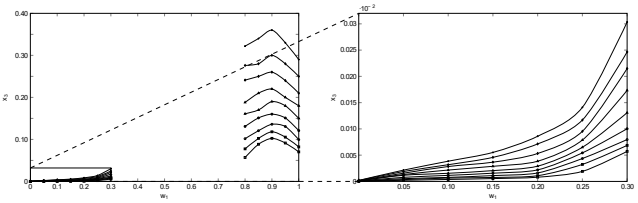


Fig. 4. Solubilidad experimental del etil-parabeno en mezclas cosolventes acetonitrilo + agua a diferentes temperaturas [15,16].

La Tabla I, muestra los parámetros de los tres modelos matematicos desafiados para el metil-parabeno, se evaluaron estos modelos, debido a que no se portan valores de solubilidad en mezclas cosolventes intermedias, por lo que la mejor opción es utilizar modelos que permitan evaluar la solubilidad en función de la temperatura.

Como criterio para la evaluación de la calidad del ajuste y para la comparación se utilizó el error porcentual medio absoluto (EPMA)

$$EPMA = 100\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{x_3^{cal} - x_3^{exp}}{x_3^{exp}}$$

Así, el modelo de Apelblat presenta un EPMA de 2.70, van't Hoff-Yaws 2.69 y Buchowski-Ksiazczak 5.04, es decir, todos los modelos presentan EPMAs muy bajos indicando una buena correlación entre los datos experimentales y calculados. Cabe destacar que en ciencias framaceuticas un modelo se considera adecuado si presenta EPMAs menores al 30% [22].

Al graficar los valores experimentales Vs los valores calculados con los tres modelos (Fig. 5) se puede apresiar una buena correlación entre los datos (r^2=0.98)

TABLE I. Parametros de los modelos matemáticos Apelblat, Buchowski-Ksiazczak y van't Hoff-Yaws, para el metil parabeno.

Modelo		**Parámetros**		
	W1	***A***	***B***	***C***
Apelblat	0.00	85.29	-8265.91	-11.53
	0.05	294.40	-17371.1	-42.84
	0.10	49.77	-5934.07	-6.43
	0.15	73.48	-6699.54	-9.98
	0.20	-52.25	-668.56	8.64
	0.25	60.08	-5512.78	-8.13
	0.30	-26.53	-1393.42	4.71
	0.75	107.80	-9120.25	-13.94
	0.80	60.23	-6971.18	-6.84
	0.85	118.36	-9623.62	-15.47
	0.90	161.83	-12009.5	-21.72
	0.95	175.64	-12741.3	-23.76
	1.00	122.76	-10018.7	-16.13
van't Hoff-Yaws	0.00	2.52	-1528.49	-490781.0
	0.05	-15.38	9044.29	-2033830.5
	0.10	3.29	-1981.22	-303406.2
	0.15	1.571	-731.82	-445185.4
	0.20	10.08	-5891.19	394057.3
	0.25	1.57	-684.45	-357848.5
	0.30	7.43	-4221.01	211687.5
	0.75	7.71	-975.81	-593002.2
	0.80	11.29	-3074.89	-275790.5
	0.85	7.05	-425.69	-682644.2
	0.90	5.15	1140.41	-994170.2
	0.95	4.22	1652.29	-1088876.6
	1.00	6.29	-191.25	-747685.7
		λ	h	
Buchowski-Ksiazczak	0.00	0.01	456159.1	
	0.05	0.013	365624.0	
	0.10	0.021	185056.3	

Modelo		Parámetros		
	W1	*A*	*B*	*C*
	0.15	0.037	93743.40	
	0.20	0.045	64904.53	
	0.25	0.063	43734.04	
	0.30	0.07	34037.87	
	0.75	8.71	634.70	
	0.80	10.779	521.84	
	0.85	13.173	439.20	
	0.90	16.29	386.72	
	0.95	11.039	561.75	
	1.00	4.815	1149.12	

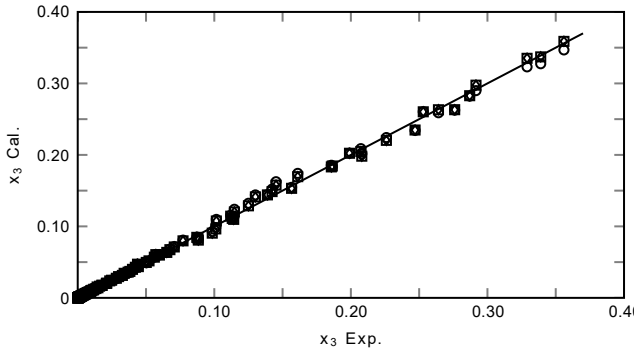


Fig. 5. Correlación entre la solubilidad experimental y calculada del metil-parabeno mediante los mdelos matemáticos: □=Apelblat, ○=Buchowski-Ksiazczak y Δ= van't Hoff-Yaws.

La Tabla II, presenta los coefientes de los modelos evaluados para la solubilidad del etil-parabeno, de nuevo los EPMAs, refelajoran la idoneidad de los modelos, así para el modelo de Apelblat se presenta un EPMA de 2.98, van't Hoff-Yaws 2.97 y Buchowski-Ksiazczak 3.35

TABLE II. PARAMETROS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS APELBLAT, BUCHOWSKI-KSIAZCZAK Y VAN'T HOFF-YAWS, PARA EL ETIL PARABENO.

Modelo		Parámetros		
	W1	*A*	*B*	*C*
Apelblat	0.00	761.36	-38035.89	-112.862
	0.05	981.22	-48044.07	-145.139
	0.10	813.38	-40946.80	-119.781
	0.15	542.41	-28908.13	-79.262
	0.20	266.85	-16768.42	-37.985
	0.25	164.12	-10831.16	-23.315
	0.30	80.19	-7120.25	-10.638
	0.80	304.21	-16808.95	-43.821
	0.85	-2.829	-2515.85	1.673
	0.90	-108.9	2383.73	17.433
	0.95	-61.68	266.75	10.364
	1.00	23.759	-3924.79	-2.194
	0.00	-52.32	30046.81	-5129151.5
	0.05	-65.78	39885.20	-6653227.2
	0.10	-50.16	31290.49	-5440712.9
	0.15	-28.99	18884.38	-3598818.4
	0.20	-6.626	5914.82	-1690923.9
	0.25	-4.36	3471.92	-1095580.6
van't Hoff-Yaws	0.30	3.938	-974.12	-442324.54
	0.80	-11.60	9560.68	-1981569.0
	0.85	9.31	-3572.37	83160.13
	0.90	16.699	-8129.734	791710.20
	0.95	12.913	-5907.31	459189.77
	1.00	8.126	-2714.644	-82570.75
		λ	h	
	0.00	0.002	1818727.79	
	0.05	0.044	115392.87	
	0.10	0.072	70096.09	
	0.15	0.104	49508.29	
	0.20	0.165	31723.89	
	0.25	0.126	31288.78	
Buchowski-Ksiazczak	0.30	0.223	16628.03	
	0.80	5.153	842.99	
	0.85	2.862	1197.88	
	0.90	2.695	1197.74	
	0.95	2.32	1366.21	
	1.00	2.701	1337.172	

La figura 6, muetra la excelente correlación entre los datos experimentales y los calculados con los tres modelos.

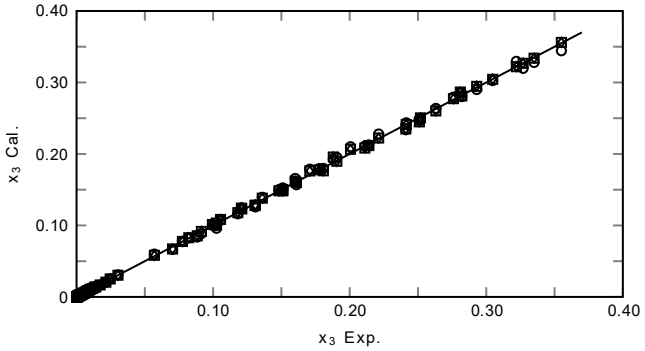


Fig. 6. Correlación entre la solubilidad experimental y calculada del etil-parabeno mediante los mdelos matemáticos □=Apelblat, ○=Buchowski-Ksiazczak y Δ= van't Hoff-Yaws.

A diferencia de los modelos de Apelblat, Buchowski-Ksiazczak y van't Hoff-Yaws, cuya variable independentie es la temperatura los modelos NRTL y Wilson permiten estimar la solubilidad de IFA a partir de la composición cosolvente.

En este contexto, a parir de los datos de solubilidad exeriemnetal de sulfametazina en mezclas cosolventes

MeCN+W reportados por Blanco-Márquez et al [23] (Fig 7) se evaluan los modelos NRTL y Wilson a cada una de las temperaturas de estudio.

La tabla 7, presenta los parametros de cada uno de los modelos. Al evaluar la caliadad de ajute, la EPMA parae el modelo de NRTL es de 7.37 y para el modelo de Wilson es de 10.88, el modelo predice la mayoría de los puntos de solubilidad experiemental, se presentan algunas desviaciones.

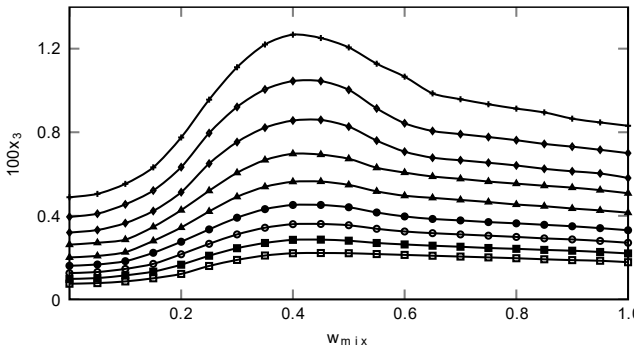


Fig. 7. Solubilidad experimental de la sulfametazina en mezclas cosolventes acetonitrilo + agua a diferentes temperaturas [23].

TABLE III. PARAMETROS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS NRTL Y WILSON, PARA LA SULFAMETAZINA.

	Parámetros NRTL					
T	τ_{12}	τ_{13}	τ_{21}	τ_{23}	τ_{31}	τ_{32}
278.15	-7.015	0.983	2.442	5.494	0.415	2.801
283.15	1.798	3.754	2.487	6.920	-1.360	-0.106
288.15	-7.992	0.791	2.654	5.414	0.551	3.520
293.15	-7.946	0.730	2.630	5.310	0.554	3.593
298.15	-8.068	0.710	2.698	5.259	0.490	4.103
303.15	2.338	1.506	-4.475	6.796	54.757	-0.294
308.15	1.527	3.056	2.686	6.556	-1.124	-0.165
313.15	-2.128	7.140	2.608	11.884	-2.453	-2.564
318.15	-2.314	6.718	2.830	11.544	-2.357	-2.473
	Parámetros NRTL					
	Λ_{12}	Λ_{13}	Λ_{21}	Λ_{23}	Λ_{31}	Λ_{32}
278.15	0.075	-0.001	-3.247	2.698	4.265	0.375
283.15	0.059	-0.001	-3.007	3.213	4.302	0.313
288.15	0.114	-0.002	-3.603	3.190	3.879	0.318
293.15	0.211	1.373	-4.234	5.556	-0.895	-4830.7
298.15	0.166	1.289	-3.916	6.547	-0.108	-6.238
303.15	0.164	1.335	-3.743	6.689	-0.109	-6.158
308.15	0.156	-0.002	-3.555	3.604	3.593	0.286
313.15	0.156	1.425	-3.630	7.287	-0.109	-6.314
318.15	2.50×10^{-5}	6.39×10^{-4}	3.372	0.472	3.518	1.833

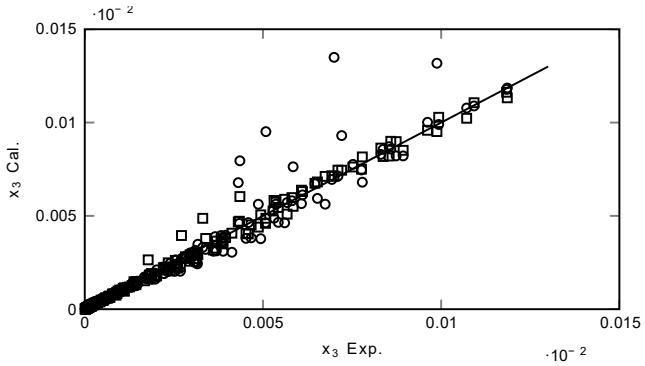


Fig. 8. Correlación entre la solubilidad experimental y calculada de la SMT mediante los mdelos matemáticos NRTL (□) y Wilson (○)

La evaluación de los 5 modelos matemáticos a partir de los datos de la solubilidad experimental de tres IFAs diferentes, las cuales presentan desafíos interesantes, como separación de fases mezclas cosolventes intermedias (Fig. 3 y 4) y máximas solubilidades en las mezclas cosolventes y no en los solventes puros (Fig. 7), permite identificar las ventajas de los modelos matemáticos a la hora de predecir la solubilidad de estas sustancias en condiciones experimentales diferentes a las reportadas.

IFAs como los parabenos y sulfonamidas son sustancias bioactivas con un potencial efecto medioambiental negativo, por los que cualquier esfuerzo que conduzca a desarrollar procesos más eficientes conducirán directamente a reducir su impacto ambiental.

V. CONCLUSIONES

Los modelos Apelblat, Buchowski-Ksiazczak y van't Hoff-Yaws se correlacionaron con los datos experimentales del metil y etil-parabeno, en todos los casos mostraron EPMA menores a 4, lo que sustenta la capacidad de los modelos para predecir la solubilidad de las IFAs en función de la temperatura, en cuanto a los modelos NRTL y Wilson, los cuales se correlacionaron a partir de los datos experimentales de la SMT presentaron EPMA menores a 10.88, pero superiores los otros modelos; sin embargo, el poder predictivo de los mismos es bueno.

En términos generales, se demuestra el potencial del modelamiento matemático en la predicción de la solubilidad de IFAs en sistemas cosolventes, los que puede ser utilizado en la optimización de procesos industriales.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Dirección Nacional de Investigación y al Comité Nacional para el Desarrollo de la Investigación de la Universidad Cooperativa de Colombia por proporcionar apoyo financiero para este estudio con el código INV2976. Además, agradecemos a la Universidad Cooperativa de Colombia en Neiva por facilitar el suministro de laboratorios y equipos.

REFERENCES

[1] A. N. Martin, and P. J. Sinko, Martin's Physical Pharmacy and Pharmaceutical Sciences: Physical Chemical and Biopharmaceutical

Principles in the Pharmaceutical Sciences, 6ta ed., Lippincott Williams & Wilkins, 2011, Philadelphia, 2011, pp 300-318.

[2] J. Harrower, M. McNaughtan, C. Hunter, R. Hough, Z. Zhang, and K Helwig. "Chemical Fate and Partitioning Behavior of Antibiotics in the Aquatic Environment-A Review", Environ. Toxicol. Chem. Vol 40, 3275–3298, 2021

[3] J. J. Agredo-Collazos, C. P. Ortiz, N. Enrique Cerquera, R. E. Cardenas-Torres, D. R. Delgado, M. A. Peña, F. Martínez, "Equilibrium Solubility of Triclocarban in (Cyclohexane+ 1, 4-Dioxane) Mixtures: Determination, Correlation, Thermodynamics and Preferential Solvation", J. Solut. Chem. (2022) https://doi.org/10.1007/s10953-022-01209-4.

[4] R. E. Cárdenas-Torres, C. P. Ortiz, W. E. Acree Jr, A. Jouyban, F. Martínez, D. R. Delgado, "Thermodynamic study and preferential solvation of sulfamerazine in acetonitrile+ methanol cosolvent mixtures at different temperatures", J. Mol. Liq. vol. 349, pp. 118172, 2022.

[5] E. Estrada, E. J. Delgado and Y. Simón-Manso, "Modeling the Solubility in Water of Environmentally Important Organic Compounds" in Thermodynamics, Solubility and Environmental Issues, Elsevier Science, 2007, pp. 17-31.

[6] D. R. Delgado, G. A. Rodríguez, J. A. Martínez, J. H. Rojas, and F Martínez, "Validación de una metodología analítica empleando espectrofotometría ultravioleta para el estudio de la solubilidad de algunas sulfonamidas en mezclas cosolventes," Rev. Colomb. Quim. vol. 42, pp. 387-412, 2013.

[7] A. Jouyban, and W. E. AcreeJr, "Mathematical derivation of the Jouyban-Acree model to represent solute solubility data in mixed solvents at various temperatures" J. Mol. Liq. vol. 256, pp. 541-547, April 2018.

[8] E. A. Cantillo, D. R. Delgado, and F. Martinez, "Solution thermodynamics of indomethacin in ethanol+ propylene glycol mixtures," J. Mol. Liq. vol. 181, pp. 62-65, Mayo 2013.

[9] D. M. Camacho-Feria, D. I. Caviedes-Rubio, and D. R. Delgado, "Tratamientos para la remoción de antibacteriales y agentes antimicrobiales presentes en aguas residuales," Revista Logos, Ciencia & Tecnología vol 9, pp. 43-62, Abril 2017.

[10] D. Baracaldo-Santamaría, C. A. Calderon-Ospina, C. P. Ortiz, R. E. Cardenas-Torres, F. Martinez, and D. R. "Thermodynamic Analysis of the Solubility of Isoniazid in (PEG 200 + Water) Cosolvent Mixtures from 278.15 K to 318.15 K." Int. J. Mol. Sci. Vol 23, pp 10190, 2022.

[11] A. Torres-Cardozo, N. Enrique Cerquera, C. P. Ortiz, J. Osorio-Gallego, R. E. Cardenas-Torres, F. Angarita-Reina, F. Martinez, D. R. Delgado, "Thermodynamic analysis of the solubility of progesterone in 1-octanol+ ethanol cosolvent mixtures at different temperatures", Alex. Eng. J. 2022. https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.035

[12] C. P. Ortiz, R. E. Cardenas-Torres, F. Martínez, and D. R. Delgado, "Solubility of sulfamethazine in the binary mixture of acetonitrile + methanol from 278.15 to 318.15 K: Measurement, dissolution thermodynamics, preferential solvation, and correlation", Molecules, vol 26, 7588, Diciembre 2021.

[13] J. H Blanco-Márquez, Y. A. Quigua-Medina, J. D. García-Murillo, J. K. Castro-Camacho, C. P. Ortiz, N. E Cerquera, and D. R. Delgado, "Thermodynamic analysis and applications of the Abraham solvation parameter model in the study of the solubility of some sulfonamides," Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm., Vol. 49, 234-255, 2020.

[14] A. T. Williamson, "The exact calculation of heats of solution from solubility data," Trans. Faraday Soc., vol 40, pp. 421-436, 1944.

[15] A. Apelblat, E. Manzurola, and N. A. Balal, "The solubilities of benzene polycarboxylic acids in water," J. Chem. Thermodyn., vol 38, pp. 565-571, 2006.

[16] A. Noubigh, M. H. Oueslati, "Measurement and modeling of the solubility of vanillin constituent of olive mill wastewater in binary water + ethanol solvents mixtures between 278.15 K and 308.15 K," Austr. J. Basic Appl. Sci., vol 8, pp. 396-403, 2014.

[17] A. Noubigh, and A. Akremi, "Experimental measurements, equilibrium study and model correlation of methyl paraben in ethanol and methanol aqueous solutions from = (293.15 to 323.15) K", J. Mol. Liq., vol 293, 111505, (2019)

[18] A. Torres-Cardozo, N. E. Cerquera, C. P. Ortiz, J. Osorio-Gallego, R. E. Cardenas-Torres, F. Angarita-Reina, F. Martinez, D.R. "Thermodynamic analysis of the solubility of progesterone in 1-octanol + ethanol cosolvent mixtures at different temperatures", Alex. Eng. J. In Press, 2022.

[19] J. Osorio Gallego, R. Cárdenas Torres, C.D. Rodriguez Quiroga, C.P. Ortiz, D.R. Delgado, SolubilityModels, Solubility Models Library, Python Package Index. (2022). https://pypi.org/project/SolubilityModels/ (Acceso 8 junio, 2022).

[20] A. M. Romero-Nieto, D. I. Caviedes-Rubio, J. Polania-Orozco, N. E. Cerquera, D. R. Delgado, "Temperature and cosolvent composition effects in the solubility of methylparaben in acetonitrile+ water mixtures," Phys Chem Liquids, vol. 58, pp. 722-735, 2020.

[21] A. M. Romero-Nieto, N. E. Cerquera, F. Martínez, and D. R. Delgado, "Thermodynamic study of the solubility of ethylparaben in acetonitrile+ water cosolvent mixtures at different temperatures," J. Mol. Liq., vol. 287, 110894, 2019.

[22] M. A. Abolghassemi Fakhree, D, R, Delgado, F. Martínez, and A. Jouyban, "The importance of dielectric constant for drug solubility prediction in binary solvent mixtures: electrolytes and zwitterions in water+ ethanol," Aaps Pharmscitech, vol 11, pp. 1726-1729, 2010.

[23] J. H. Blanco-Márquez, C. P. Ortiz, N. E. Cerquera, F. Martínez, A. Jouyban, "Thermodynamic analysis of the solubility and preferential solvation of sulfamerazine in (acetonitrile+ water) cosolvent mixtures at different temperatures," ," J. Mol. Liq., vol. 293, 111507, 2019

Using DSAS tool to determine shoreline changes in San Carlos Beach, Panama

Víctor Gómez
Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
victor.gomez3@utp.ac.pa

Gisselle Guerra-Chanis*
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas,
Universidad Tecnológica de Panamá.
Sistema Nacional de Investigación – SNI
CEMCIT-AIP
COIBA-AIP.
Ciudad de Panamá, Panamá
gisselle.guerra@utp.ac.pa

***Abstract*—Shoreline changes are linked to beach processes and its hydrodynamics. Also, it is a key tool to assess natural and anthropogenic effects on the coast. This study aims to determine shoreline changes in the San Carlos beach in Panama. Shoreline positions were determined via drone flyovers with a DJI Phantom 4 drone, equipped with RTK technology. The first drone flyover was done in 2020 and the second on 2022. A two-year analysis on its shoreline was done with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS-USGS). DSAS performs a statistical analysis of shoreline position changes. San Carlos beach was divided in 47 beach transects. Results indicate that erosion and accretion occurred parallelly in the San Carlos beach segment. A total of 79.44 linear meters of sand were lost during the time elapsed between 2020 and 2022. Shoreline changes might be driven by seasonal changes. Improving the surveying strategy with satellite imagery, seasonal flyovers, and taking into consideration climate change effects will help to understand shoreline response to hydrodynamic events. Then, an integrated insight for risk management could be provided.**

Keywords—coastal erosion, beach survey, RTK-GPS, coastal management, coastal model, risk

Resumen—Los cambios en la línea de costa está vinculados a los procesos de la playa y a su hidrodinámica. Además, son una herramienta clave para evaluar los efectos naturales y antropogénicos en la costa. Este estudio busca determinar los cambios en la línea de costa en la playa de San Carlos en Panamá. La posición de la línea de costa fue determinadas a través de sobrevuelos con un dron DJI Phantom 4, equipado con tecnología RTK. El primer sobrevuelo se realizó en 2020 y el segundo en 2022. Un análisis de dos años fue realizado con el Sistema de Análisis de Línea de Costa Digital (DSAS-USGS). DSAS realizó un análisis estadístico de los cambios en la posición de la línea de costa. El segmento de playa de San Carlos fue dividido en 47 transectos. Los resultados indican que paralelamente ocurrieron procesos de erosión y acreción. Un total de 79.44 metros lineales de arena se perdieron en el tiempo transcurrido de 2020 al 2022. Los cambios en la línea de costa podrían estar impulsados por cambios en la temporada. Mejorando la estrategia de levantamientos con imágenes satelitales, sobrevuelos por temporada, y tomando en cuenta los efectos del cambio climático se entendería la respuesta de la costa ante eventos hidrodinámicos. Entonces, una visión integrada para el manejo de riesgos puede ser provista.

Palabras clave—erosión costera, topografía de playas, RTK-GPS, riesgo, manejo de costas, modelo de costa.

I. Introduction

Coastal systems are affected by natural and anthropogenic drivers. To understand processes in coastal systems and predict coastal vulnerability it is necessary to consider dynamic components, such as water levels during storms, storm surges and seasonal water level anomalies [1]. According to satellite images between 1984 and 2015, an estimate of 28 000 km^2 were eroded from coasts around the world [2]. Although coastal erosion is happening at a global scale, local studies are needed to reduce uncertainty and have a better understanding of the relation between morphological and hydrodynamic conditions [2], [3]. Extreme climatological conditions might aggravate coastal erosion in the Pacific Coast of Panama in the following years [1], [4].

Coastal management, and long-term monitoring schemes are needed [5], [6]. Conventional techniques of beach survey merged with new technologies such as LiDAR, RTK-GPS, and satellite imagery improves the spatial analysis of shoreline variability [7]. Hoojer and Vernimenn calculated that 649 000 km^2 of land area worldwide are vulnerable to sea level rise using LiDAR satellite data [8]. Recent studies have concluded that Panamanian coasts are vulnerable and exposed to risk due to climate change effects and anthropogenic influence [3], [9]. Playa de Mogo Mogo, located in the Archipiélago de las Perlas, Pacific of Panama, showed a 19% of sand-loss from its equilibrium beach profile and it was attributed to submarine sand extraction [9].

This study aims to determine shoreline changes due to coastal erosion and accretion in the San Carlos beach in the Pacific coast of Panama between 2020 and 2022. To do this, it will be applied recent beach surveying techniques along with aerial images to calculate net shoreline movement and erosion rate on the study site. Climate change and anthropogenic effects might be considered in further analysis.

Quantifying the rate of coastal erosion/accretion and hence, understanding that geomorphological conditions are affected by hydrodynamical events (tides, waves, etc.) plays a key role in applied coastal risk assessment and management. Moreover, establishing a methodology to replicate coastal erosion studies along with risk assessment due to climate changes impacts will provide scientific knowledge for risk mitigation and preparedness.

II. Methodology

A. Study Site

Panama has around 3000 km of shoreline, considering the Pacific and Atlantic coasts. This assessment took place in the San Carlos beach (Fig. 1), located in the Panama Oeste province in the Pacific coast of Panama. A beach segment of 243.41 meters length was analyzed. The Panama Oeste province shoreline changed in the past 20 years due to is intensive urban development. The San Carlos beach segment coincides with a survey done by the Ministry of Environment in 2020.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00085

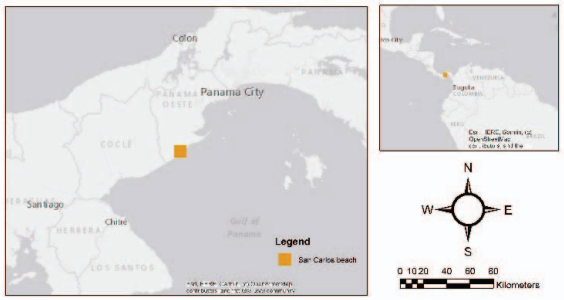


Fig. 1. Study Site: San Carlos beach, Panama Oeste province

B. Beach Survey and Shoreline Delimitation

The first step was to determine coastal geomorphology and determine the shoreline position at a determined time. Real Time Kinematic (RTK) survey method for beach topography has been proved as one of the most common, highly accurate, and time effective methods [7], [10]. In this study, RTK-GPS in-situ method was used to survey a shoreline segment in the San Carlos beach. RTK-GPS spot measurements could reach a 2 cm vertical error and a root mean square error (RMSE) of 5 cm, making it suitable to assess beach profiles and morphological changes in shorelines [7], [10], [11]. To quantify beach erosion and shoreline changes RTK-GPS method has been successfully applied and is considered the most suitable method for three-dimensional beach assessment [7], [10].

Lately, the RTK technology has been applied jointly with drone technology. DJI Phantom 4 RTK drone has been applied for coastal region mapping and monitoring, speeding up the process with precise results [12]. Studies have proved that drone RTK methods is highly precise with a single Ground Control Point (GCP), reaching resolutions of 1.7 to 4 cm/pix and RMSE of 0.051 ± 0.004 m of vertical error [11][12]. The combined use of RTK-GPS and drone technology made data collection more efficient in terms of time and covered area. The surveys were corrected using a geodesic reference point located in San Carlos town.

Beach monitoring techniques, applied in long-term schemes, could allow scientists to establish a relationship between extreme storm events and coastal erosion [3]. This option should be considered for further studies on shoreline changes and erosion in the coasts of Panama since in situ monitoring is deficient.

C. Digital Shoreline Analysis System Tool

The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) is a tool developed by the United States Geological Survey to calculate rate of change during a determined time series for a selected shoreline segment [13]. DSAS tool allowed us to understand shoreline changes as accretion or erosion, relating these processes to factors of influence such as wave height, tidal ranges, sea level, beach morphology and other climate driven factors [1], [14]. The use of the DSAS tool along with high resolution satellite imagery and drone RTK survey allows a perspective of coastal response to different factors such as: storms surges, sea level changes, and sedimentation processes; hence, it improves decision making related to coastal management [15], [16].

DSAS tool was used to calculate the Net Shoreline Movement and End Point Rate in San Carlos beach [13]. The first was to determine the topographical conditions of 2020 and 2022 shorelines. Second, to create a Geodatabase using ArcGIS [16]. Shorelines from 2020 and 2022 were compared to a baseline (green line, Fig. 2), and analyzed with statistical models by transect [16]. For the San Carlos beach segment, transects were 5-meter spaced, resulting in 47 transects (Fig. 2). The application of the DSAS tool has proven to successfully identify accretion and erosion rates on sandy beaches [16].

III. Results and Discussion

DSAS tool allows us to calculate different statistical rates to understand shoreline behavior in at least two different times. For the San Carlos beach segment, it was applied the

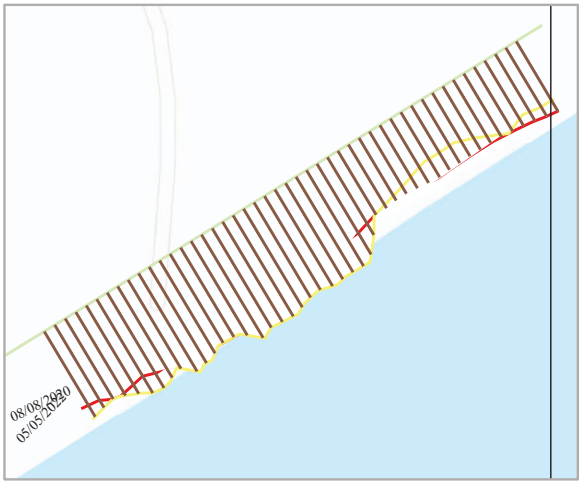


Fig. 2. DSAS analysis. Baseline in green color, 2020 shoreline in red color and 2022 shoreline in yellow color.

Shoreline Change Envelope, the Net Shoreline Movement Rate, and the End Point Rate. Each method applied, helped to understand behavior of the San Carlos beach shoreline from 2020 to 2022.

The Shoreline Change Envelope (SCE) represents the maximum distance in shoreline position change in meters for each beach transect [19]. For the San Carlos beach segment, a total of 215 meters changed between 2020 and 2022 (Fig. 3). This number was obtained by summing each transect change in meters. However, the SCE does not specify if the change was due to erosion or accretion.

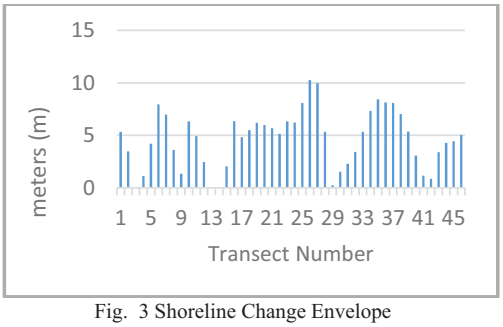


Fig. 3 Shoreline Change Envelope

The Net Shoreline Change (NSM) represents the distance of change for each transect in the San Carlos beach segment [19]. The positive values for NSM represent accretion of the shoreline, the negative values represent beach erosion. Zero values could be interpreted as no change through time. Average value of NSM indicates the average change in shoreline position for the 47 transects casted by DSAS.

For the San Carlos beach the average value of NSM was 1.22 meters and the net change was 56.1 meters for all transects. This means that the San Carlos beach has gained 56.1 linear meters between 2020 and 2022 (Fig. 4).

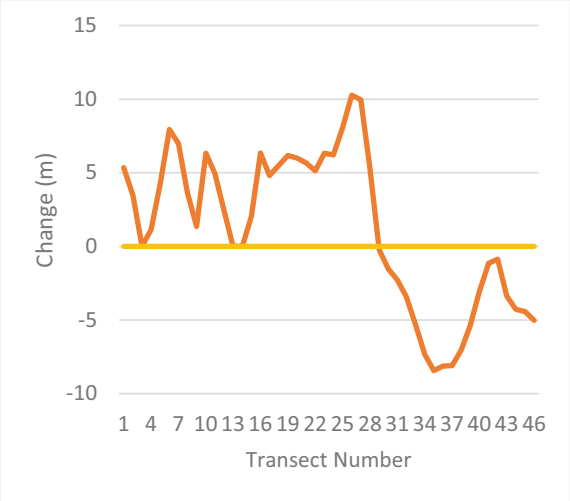


Fig. 4 Net Shoreline Movement (m).

However, for transects 30 to 47 NSM values indicate that the San Carlos beach segment lost 79.44 linear meters of sand during the time elapsed between 2020 and 2022 (Fig. 4). Seasonal monitoring is needed to understand the response of these beach segments to seasonal events like storms and storm surges and others.

Finally, the End Point Rate (EPR) calculates the rate of NSM during the time elapsed. EPR represents the intensity of change (erosion or accretion) in time (Fig 5). Transects 25 to 28, were the most intense regarding sand gaining for the 2020 to 2022 period. Transects 34 to 37 show the highest sand loss for this same period. This would help to understand that changes in hydrodynamics, sediment transport and others, natural or anthropogenic factors, could accelerate coastal processes. The rate of NSM can be related to specific meteorological events that occurred between 2020 to 2022 like El Niño and La Niña Southern Oscillation extremes, tropical cyclones, etc.; it evidences that erosion and accretion processes are affected by several factors including climate and human activity.

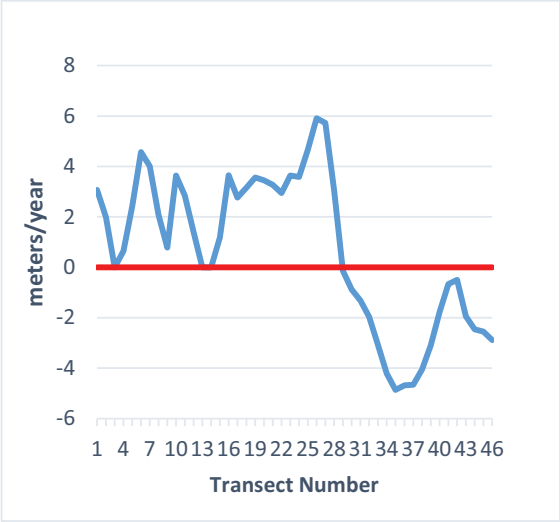


Fig 5. End Point Rate (meters/year)

IV. Conclusions

Shoreline change in the San Carlos beach was estimated between 2020 and 2022 with the DSAS tool. The importance of applying this tool is that it helps to sectorize the occurrence and intensity of erosion and accretion processes transect by transect. Erosion rates (EPR) on transects 34 to 37 reached its minimum for the time elapsed between 2020 and 2022, indicating high erosion rates. It is important to consider the seasonal time when the beach surveys were performed. The 2020 survey was happened in the middle on the rainy season; the 2022 survey happened in the beginning of the rainy season. This might indicate that accretion and erosion processes are driven by seasonal changes. However, to confirm this a different monitoring strategy is needed.

The DSAS tool strategy might also be validated on the field. Another key factors like anthropogenic structures and coastal land use through the years should be taken into consideration to analyze the response of the San Carlos beach to hydrodynamic variables like tides, waves, and storm surges.

Further assessment of the San Carlos Beach must take into consideration climate change effects and more historical data regarding shoreline position. Comparing shoreline changes between dry and wet season, might give evidence of beach response to hydrometeorological events. Also, the use of high-resolution satellite imagery must be considered to cover several shoreline positions at several times. This will help to relate shoreline movement to recorded hydrometeorological events. Taking this into consideration, climate change effects like an increase in storm frequency and intensity could be analyzed at a local scale as a driver for erosion and flooding. This will give a more integrated insight to policy makers and government entities regarding risk assessment and preparedness.

V. Acknowledgements

With the cooperation from the Ministry of Environment it was possible to use a DJI Phantom 4 RTK drone to survey the San Carlos beach segment. Also, thanks

to SENACYT for the support provided to the M. Sc. in Water Resources program of the Universidad Tecnológica de Panamá. Equal thanks to the Sistema Nacional de Investigación (SNI), SENACYT for the support given to one of the authors.

REFERENCES

[1] P. Barnard et al., "Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation", Nature Geoscience, vol. 8, no. 10, pp. 801-807, 2015. Available: 10.1038/ngeo2539.J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[2] L. Mentaschi, M. Vousdoukas, J. Pekel, E. Voukouvalas and L. Feyen, "Global long-term observations of coastal erosion and accretion", Scientific Reports, vol. 8, no. 1, 2018. Available: 10.1038/s41598-018-30904-w.

[3] MiAmbiente. Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Panamá.

[4] C. Leaman, M. Harley, K. Splinter, M. Thran, M. Kinsela and I. Turner, "A storm hazard matrix combining coastal flooding and beach erosion", Coastal Engineering, vol. 170, p. 104001, 2021. Available: 10.1016/j.coastaleng.2021.104001.K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.

[5] C. Martínez, M. Contreras-López, P. Winckler, H. Hidalgo, E. Godoy and R. Agredano, "Coastal erosion in central Chile: A new hazard?", Ocean & Coastal Management, vol. 156, pp. 141-155, 2018. Available: 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011.

[6] M. El-Mahdy, A. Saber, F. Moursy, A. Sharaky and N. Saleh, "Coastal erosion risk assessment and applied mitigation measures at Ezbet Elborg village, Egyptian delta", Ain Shams Engineering Journal, vol. 13, no. 3, p. 101621, 2022. Available: 10.1016/j.asej.2021.10.016.

[7] M. Harley, I. Turner, A. Short and R. Ranasinghe, "Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring", Coastal Engineering, vol. 58, no. 2, pp. 194-205, 2011. Available: 10.1016/j.coastaleng.2010.09.006.

[8] A. Hooijer and R. Vernimmen, "Global LiDAR land elevation data reveal greatest sea-level rise vulnerability in the tropics", Nature Communications, vol. 12, no. 1, 2021. Available: 10.1038/s41467-021-23810-9.

[9] L. M. Gonzalez and A. Dominici-Arosemena, "Perfiles de playa como indicadores de impacto de la actividad de extracción de arena submarina en el Archipiélago de Las Perlas", Tecnociencia, vol. 15, no. 2, 2013.

[10] J. Lee, J. Park and J. Choi, "Evaluation of Sub-aerial Topographic Surveying Techniques Using Total Station and RTK-GPS for Applications in Macrotidal Sand Beach Environment", Journal of Coastal Research, vol. 65, pp. 535-540, 2013. Available: 10.2112/si65-091.1.

[11] E. Casella, J. Drechsel, C. Winter, M. Benninghoff and A. Rovere, "Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry", Geo-Marine Letters, vol. 40, no. 2, pp. 255-268, 2020. Available: 10.1007/s00367-020-00638-8.

[12] Y. Taddia, F. Stecchi and A. Pellegrinelli, "USING DJI PHANTOM 4 RTK DRONE FOR TOPOGRAPHIC MAPPING OF COASTAL AREAS", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. -213, pp. 625-630, 2019. Available: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w13-625-2019.

[13] Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., and Farris, A.S., 2021, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091, 104 p.

[14] C. Santos, T. Nascimento, M. Mishra and R. Silva, "Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil", Science of The Total Environment, vol. 769, p. 144889, 2021. Available: 10.1016/j.scitotenv.2020.144889.

[15] N. Thinh* and L. Hens, "A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes along the Giao Thuy coastal area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014", VIETNAM JOURNAL OF EARTH SCIENCES, vol. 39, no. 1, 2017. Available: 10.15625/0866-7187/39/1/9231.

[16] K. Nassar, W. Mahmod, H. Fath, A. Masria, K. Nadaoka and A. Negm, "Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt", Marine Georesources & Geotechnology, vol. 37, no. 1, pp. 81-95, 2018. Available: 10.1080/1064119x.2018.1448912.

[17] M. Albuquerque, J. Espinoza, P. Teixeira, A. de Oliveira, I. Corrêa and L. Calliari, "Erosion or Coastal Variability: An Evaluation of the DSAS and the Change Polygon Methods for the Determination of Erosive Processes on Sandy Beaches", Journal of Coastal Research, vol. 165, pp. 1710-1714, 2013. Available: 10.2112/si65-289.1.

[18] J. Pollard, T. Spencer and S. Brooks, "The interactive relationship between coastal erosion and flood risk", Progress in Physical Geography: Earth and Environment, vol. 43, no. 4, pp. 574-585, 2018. Available: 10.1177/0309133318794498.

[19] Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., and Farris, A.S., "Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091", 104 p., 2021, Available: https://doi.org/10.3133/ofr20211091.

Coupling Sensitivity and Correlation Analyses to Identify Important Modeling Variables in a Naturally-Ventilated Building

María Jaén
Grupo de investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Dept. of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panama
maria.jaen@utp.ac.pa

Ana K. Rivera
Grupo de investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Dept. of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panama
ana.rivera3@utp.ac.pa

Miguel Chen Austin*
Grupo de investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Dept. of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panama
*miguel.chen@utp.ac.pa

***Abstract*— Implementation of natural ventilation as a method of air supply and cooling of a building has the potential of reducing the amount of energy that must be consumed to serve this purpose by traditional mechanical devices. The optimization of this method is heavily influenced by the decisions taken during the initial design phase of a building project. Through building performance simulation, the selection of parameters and the design decisions are more asserted to an optimal goal performance, however, methods such as sensitivity and correlation analyses provide a deeper understanding of the interactions that many of these parameters have between each other and with the expected output of the simulation. Therefore, the present research combined both methods to identify the most significant variables and parameters involved in the thermal dynamics of a naturally ventilated single-story building under the climate conditions of Panama City, Panama. Results showed that combining these two approaches opens the possibility of developing a sufficient analysis regarding the influence that many secondary parameters have on the most influential ones over the output performance, therefore strategic changes can be elaborated furtherly.**

Keywords—correlation analysis, natural ventilation, passive building, sensitivity analysis.

I. Introduction

Natural ventilation in edifications has become an attractive cooling strategy applied as an air supply method in buildings, with the main advantage of not relying on mechanical mediums powered by electricity to serve this purpose. Multiple studies have stated, through the results of dynamic simulations and physical modeling, the potential of natural ventilation in energy saving [1]–[3]. Natural ventilation as a passive mode of operation in buildings can be modeled mathematically if the heat transfer mechanism is identified, in tandem with the element of the building that is subjected to said heat transfer mechanism. To achieve this, the different variables that partake in these processes need to be identified, and hence their level of relevance according to the circumstances must be established.

Performing a sensitivity analysis allows ranking the variables that take part in the processes where a heat transfer mechanism exists, in order of importance, according to the parameters related to thermal behavior and building performance that were considered for each corresponding case. A sensitivity analysis was executed by Rivera et al. [4] in the case of a building operating in passive mode. The windows were stated as completely closed, and there was no air conditioning to consider. Similarly, Meng et al. [5] conducted a sensitivity analysis on the case of a naturally ventilated industrial building, but the variables considered affected the design of the building envelope. Therefore, these variables were more related to the physical characteristics of the outer structure of the building. In contrast, Rivera et al. considered parameters such as site orientation and the ground floor construction.

A sensitivity analysis is a strategy that can be conveniently applied to a gray-box model; a gray box model will rely on the existing data to describe the physical process of a particular case while considering prior physical knowledge that will not necessarily be described as explicitly as it would in the case of a white box model. Belleri et al. [6] applied a sensitivity analysis to a model that studies a building that operated with natural ventilation, intending to allocate the sources of uncertainty present in the input, which was predicted to traduce as uncertainty in the output. This methodology opened the possibility of improving the model; to quantify and reduce the amount of uncertainty associated with the performance of natural ventilation in that model. Likewise, Breesch and Janssens, through the application of an uncertainty analysis, were able to indicate that the variable with the most significant uncertainty output in their case study was thermal comfort, under the conditions of a single office in which its mode of operation corresponds to single-sided night natural ventilation [7].

An uncertainty analysis, analogous to the implementation of a sensitivity analysis, is a strategy that can be applied to a gray-box model. The input parameters of a model will always possess a certain amount of uncertainty which will depend on different factors according to certain model conditions, including the lack of knowledge that inherently exists during the initial design phase [8]. Variations in the design during the initial design phase will account for the uncertainty in the initial design parameters. In contrast, the uncertainties given the specific scenario assumed for the case study will be accounted to the usage of the building, which considers parameters such as the building's window operation and climate change considerations [9].

For the case of a building whose operation mode corresponds to a passive mode, sensitivity and uncertainty analysis have been implemented concurrently for a wide range of objectives. Chen et al. [10] propose a methodology where a probabilistic approach is compared to a deterministic one

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00086

through simulations. Thus, the deterministic approach is compared to the uncertainty analysis, which leads to the conclusion that if only the results of the deterministic analysis are considered, the study could leave the risks of overheating unnoticed. In another study, an uncertainty analysis was executed to evaluate the feasibility of the passive mode of an office building with a passive mode of operation. Two variants of this mode were considered; one that considers solely diurnal manual window operation and one that combines this scheme with passive night ventilation [11].

Performing a correlation analysis is convenient because the results of this analysis will indicate how strong the influence of one particular variable is over another variable, and therefore, the possibility of quantifying this closeness or relationship between variables through the correlation coefficient R is provided [12]. Chen Austin evaluated the impact that gathered outdoor data had on indoor data from the corresponding case study through the implementation of a correlation analysis based on the Pearson correlation coefficient R. A threshold criterion regarding the value of the Pearson coefficient R was considered with the objective of discerning between strong and weak correlations between variables [13]. A correlation analysis is also helpful in providing insightful information for decision-making during the initial design process of a building project, as reported by Liu et al. They address, in their study, the interrelationship that exists between the energy performance of a building and parameters such as layout design and their plane shape. The correlation between said parameters is assessed via correlation analyses, which leads to conclude that things such as plane type, as mentioned earlier, will affect the energy consumption of said office building [14].

Given that these three strategies, mainly the sensitivity and uncertainty analyses, have been widely used for building energy performance simulations for multiple purposes and principally as support in decision making during the initial design phase [15], the intention of this study is the identification of the most relevant parameters in a given case where a passive mode of operation is considered, through the combined analyses of these three approaches, not only to determine the most relevant parameters but to consider the interrelationship that these parameters have to other variables and how this correlation affects their relevance in the said case study.

Thus, this research combines two approaches to identify the most significant variables and parameters involved in the thermal dynamics of a naturally ventilated single-story building under the climate conditions of Panama City, Panama.

II. Methodology

A. Description of the case study

A single-story residential building located in Panama is modeled in the DesignBuilder software, v7.0.1.6 [16] (Fig. 1). The building operates in a passive mode, i.e., with windows closed all the time and without air conditioning. The envelope materials characteristics used for the external walls, roof, floor, and windows, are summarized in Table 1. The building is occupied by one person all day. No trees or other dwellings around the residence under study are considered.

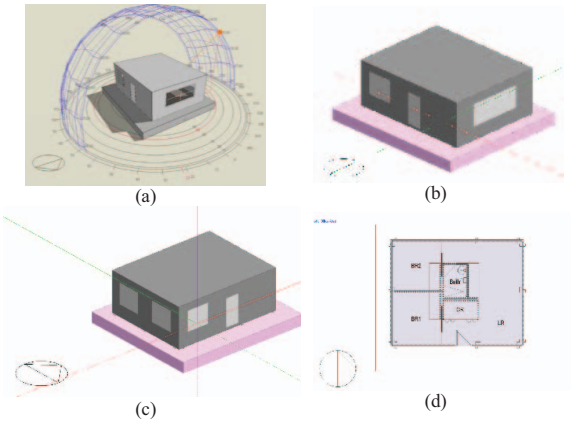


Fig. 1 3D model of the single-story building: Isometric view to show each façade (a)-(c), and the plant view (d). BR, CR, LR, corresponds to the bedroom, control room, and living room, respectively.

TABLE I. CONSTRUCTION CHARACTERISTICS OF EACH CASE STUDY.

Envelope characteristics	Value
U walls (W/m^2-K)	2.174
U roof (W/m^2-K)	2.326
U floor (W/m^2-K)	0.25
SHGC for windows	0.72
U windows (W/m^2-K)	3.772

U: Thermal transmittance. SGHC: Solar Heat Gain Coefficient.

Typical meteorological data was used as simulation data provided by CLIMdata Solargis® for Panama City. Panama City is under tropical savanna climate conditions (Awi) according to the classification of Köppen Geiger [17].

The building is submitted to four scenarios to have sufficient input data for both the sensitivity and correlation analyses, with enough external excitations for indoor air temperature fluctuation generation. These scenarios are characterized by the windows operation schedule, namely operation modes (Table 2). The infiltration or natural ventilation flow rates resulting from each operation mode are estimated directly by the software algorithm depending on the wind speed and direction at each window height (discharge coefficient of 0.65), following the airflow network approach.

TABLE II. OPERATION MODES IMPLEMENTED.

Operation mode	Window operation schedule
M1	100% Open 24/7
M2	Closed 24/7
M3	100% open from 8:00 AM – 5:00 PM
M4	100% open from 7:00 PM – 5:00 AM

B. Approaches to identify most important variables

1) Sensitivity and uncertainty analyses: In this case study, the sensitivity and uncertainty analysis tool integrated into DesignBuilder was used to identify the essential variables. This allowed the user to set up to ten design variables regarding different building aspects, systems characteristics, occupancy density, and internal gains. For each design variable, an unlimited number of options can be applied (depending on the computational power). Table 3

shows the design variables and options studied. This tool automatically runs the simulation by changing the chosen options. Each iteration (or simulation) presents a different combination of the options to estimate the desired output, which is an aspect of interest in the building. Here, the desired output chosen was the discomfort hours based on the ASHRAE 55 index, summer adaptive discomfort hour with 80% of acceptability [18]. This index is recommended for naturally ventilated thermal zones, where no mechanical system is used.

TABLE III. DESIGN VARIABLES AND THEIR CORRESPONDING ADOPTABLE VALUES THAT WERE IMPLEMENTED IN THE SENSITIVITY ANALYSIS.

Design Variables	Values
Flat roof construction (F.R.C.)	5 Options: Clay tiles, Insulated mediumweight CFR, Heavyweight FR, Project FR, MB.
Glazing Type (G.T.)	5 Options: Internal glazing, VG (U: 0.35-0.70), Project external glass
External Window Operation Schedule (E.W.O.S.)	4 Options: M1, M2, M3, M4
External Wall Construction (E.W.C.)	8 Options: Insulated and uninsulated brick walls, uninsulated and super insulated wall, among others.
%WWR	Distribution parameters with a minimum value of 30 and a maximum value of 50.
Site Orientation (S.O.) (°)	Distribution parameters with a minimum value of 0º and a maximum value of 315º.
Groud Floor Construction (G.F.C.)	8 Options: Multiple variations of combined GF, Slab-on-grade, Project GF.
Occupancy density (O.D.)	Distribution parameters consist of a mean of 0.1 and a ST of 0.01 (people/m^2)

MB: Metal build. ST: Standard deviation. WWR: Window-to-wall ratio.

Moreover, the sensitivity analysis is based on the standardized regression coefficient (SRC) and employs the Sobol-based random sampling for each iteration combination. A minimum number of iterations are needed to achieve both a statistical significance (p-value < 0.05) among the variables' SRC values and a normal distribution in the uncertainty analysis. Some authors recommend a minimum of ten times the total number of design variables [8]. Here, different numbers of iterations were studied to explore the sensitivity analysis: 60, 100, 300, and 500 iterations.

This preliminary case study only covers these analyses for limited input data not to compromise the total computational power; two data sets are used: Hourly simulation results from (1) March to April and (2) September to October. Finally, the sensitivity analysis tool developed a report where the essential variables are presented. The sensitivity analysis that was executed is global since the effect on the output's uncertainty is considered individually by the simulation by considering the uncertainty in the input, while the input is sampled through the constant variation of each variable [15].

2) Pearson-based correlation plot: To complement the sensitivity analysis using the integrated tool in DesignBuilder, a Pearson-based correlation plot was built in the software RStudio. This allowed a deeper understanding of the building thermal dynamics since it considers directly operational variables (or state space variables) such as the indoor air temperature, operative temperature (an adequate indicator of indoor environment comfort), mean radiant temperature, relative humidity, solar radiation heat gains, and envelope heat gains. Besides, it allowed the incorporation of the weather variables such as solar radiation, outdoor air temperature, wind speed, and direction, among others.

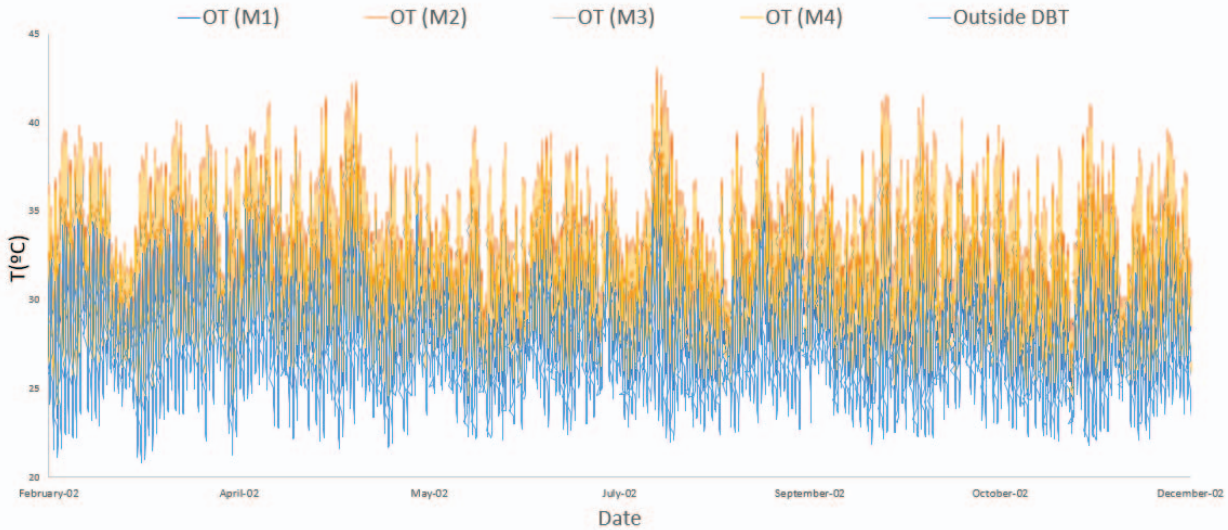


Fig. 2 Annual operative temperature corresponding to each operation mode and outside dry-bulb temperature with respect to time.

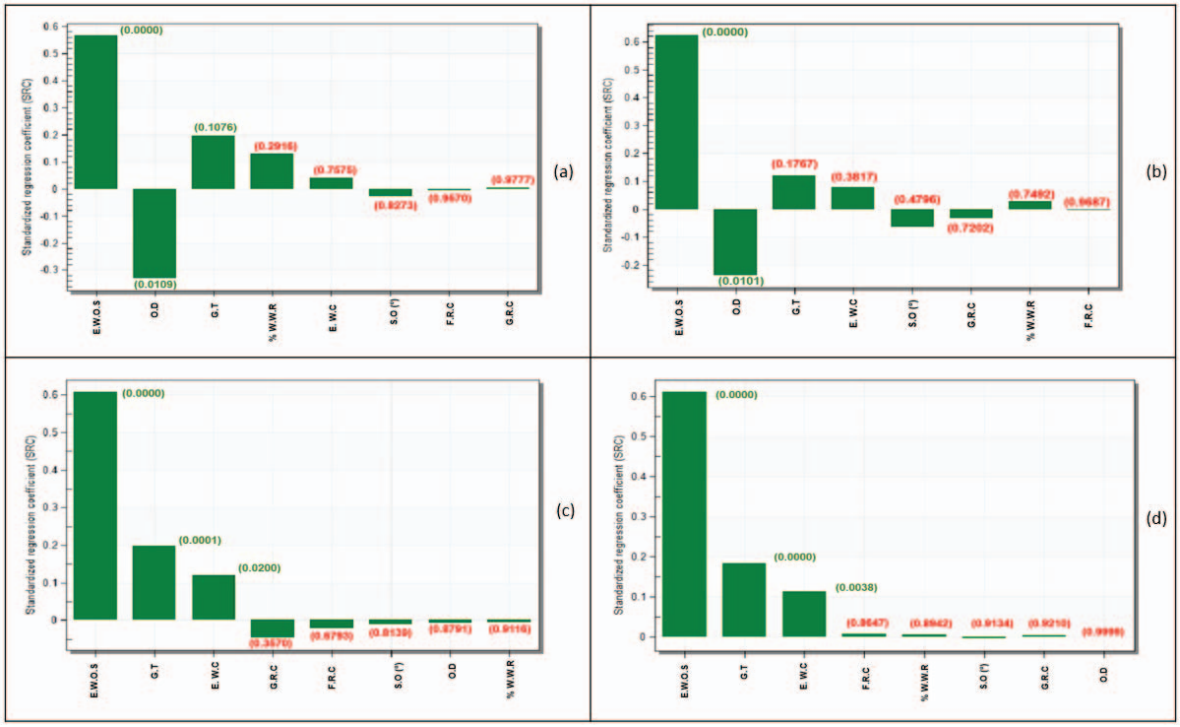


Fig. 3 Results of the sensitivity analysis for discomfort hours based on the ASHRAE adaptive 80% of acceptability, using an annual simulation with different numbers of iterations: (a) 60 simulations, (b) 100 simulations, (c) 300 simulations, (d) 500 simulations.

Since the DesignBuilder sensitivity analysis tool directly provides the resulting important variables, for the correlation analysis here, the importance criterion is based on the Pearson coefficient and the determination coefficient (R^2) value. As stated in [19] a $R^2 > 0.5$ is considered as to significantly represent the independent variable behavior, the corresponding Pearson coefficient (R) value would be 0.71. Thus, the important variables are chosen among those deploying a R value above or near 0.71 on the correlation plot.

III. Results Analysis and Discussion

A. Thermal dynamics of the indoor environment

Four dynamic simulations were performed for each mode of operation for a run period of one year and the results were displayed for each hour of a day. The building's operative temperature (OT) was considered for each mode of operation as well as the dry bulb outside temperature. These five temperatures are displayed in the graph shown in Fig. 2 with respect to time: M1 (dark blue), M2 (red), M3 (grey), M4 (orange), Outside DBT (light blue).

It can be observed that all OT resulted in higher temperature values than the outdoor air temperature (Outside DBT); none of them lower, indicating that natural ventilation appears not to be effective even during the night when values near 24°C are reached by the Outside DBT and having significant opening area (Fig. 1). OT values above the upper comfort limit are reached and even beyond 35°C (for gray, yellow, and orange lines).

B. Sensitivity and uncertainty analyses

The number of iterations had a noticeable effect on the hierarchy of the variables ranked according to their influence of the output throughout the execution of the sensitivity analysis. Because of this, four analyses were carried out with a different number of iterations.

Regardless of the number of iterations, some parameters retained their position in the hierarchy of importance. For instance, the most relevant parameter coincidentally never changes its position. This parameter corresponds to the external window operation schedule. Similarly, the variable corresponding to site orientation retains its position as the sixth most important variable in three out of the four sensitivity analyses performed. In the second simulation, where the iteration number chosen corresponds to 100, this variable is moved one position downwards in the hierarchy.

By comparing the results from the first and the second SA, simulations that were executed with 60 and 100 iterations, respectively, a noticeable aspect of both graphs is that the three most influential parameters remain unchanged until the third SA with 300 iterations is executed. These parameters correspond to the external window operation schedule, the occupancy density, and the glazing type. Likewise, the first three most influential parameters for the SA performed with 300 and 500 iterations, respectively, retain their positions. The second and the third most significant parameters in these cases correspond to glazing type and to the external wall construction, respectively. A higher number of iterations is expected to improve the accuracy of the sensitivity analysis output in terms of the p-value and reduce the amount of uncertainty that the output presents.

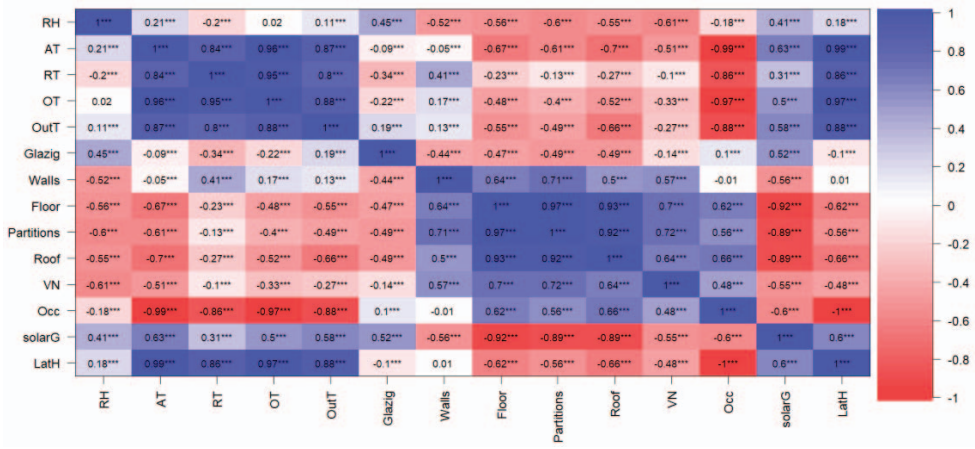


Fig. 5 Corrplot for the operation mode M4 using annual hourly results.

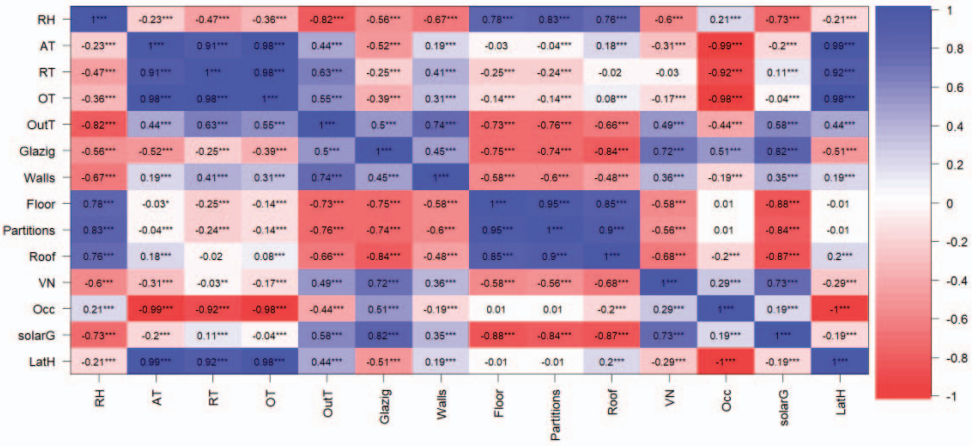


Fig. 4 Corrplot for the operation mode M3 using annual hourly results.

The uncertainty analysis, not presented here, gives insight into the frequency in which a particular configuration of variables from the considered pool of adoptable values will achieve a certain amount of Adaptive Comfort ASHRAE 55 80% Acceptability [18]. The mean output in every simulation done for the uncertainty analysis is never higher than 900 hours, the highest value being 895 hours, corresponding to the simulation done with 300 iterations. This indicates that the most frequent configurations assessed by the uncertainty analysis are relatively close to this value. However, the other simulations presented mean values similar to the one previously mentioned. For example, the lowest mean value, i.e., 858 hours, corresponds to the analysis of 60 iterations. The rest of the three analyses present an output mean value higher than 890 hours but lower than 900 hours.

C. Pearson-based correlation analysis

The output for the correlation analyses performed for each operation mode simulation data is expressed via the corrplots presented in Figs. 5, 6, 7, and 8. The numbers in the color matrix are the Pearson correlation coefficient (PCC), indicating the strength and nature of the relationship between variables. The p-value tendency is represented as asterisks, where "*," "**," and "***" correspond to "<0.05", "<0.01," and "<0.001," respectively. Visually, the relationship between variables can be interpreted according to the intensity of the color; an intense blue indicates a strong direct relationship between variables. The main diagonal of each corrplot presents a PCC of 1 because the relationship that is being referenced is between the same variable. A red matching box indicates that a strong inverse relationship exists between the two matching variables; hence the PCC will appear to be negative. Envelope elements, such as roof, floors, and partitions, present strong direct relations with each other. Similarly, a very influential parameter over the windows, such as the glazing, can be analyzed. Supposing that a considerable amount of heat is transferred through the window, in that case, the indoor temperature will increase, thus decreasing the difference between the indoor and outdoor temperatures, leading to a smaller magnitude of heat transferred through the floor, the roof, and the partitions. Considering the significant number of windows, the glazing is important because it will increase or decrease the heat transfer depending on its U-value.

It can be mentioned that the glazing has the strongest inverse relationship with the floor, roof, and partitions when M1 operation mode is active. Similar results were found by [19]. This could be translated into a temperature difference between such envelope elements and their heat radiation exchange; as one of them may have a higher temperature than the other, the former discharges itself toward the latter by radiation heat transfer. From the indoor air point of view, this may indicate that while one of these envelope elements

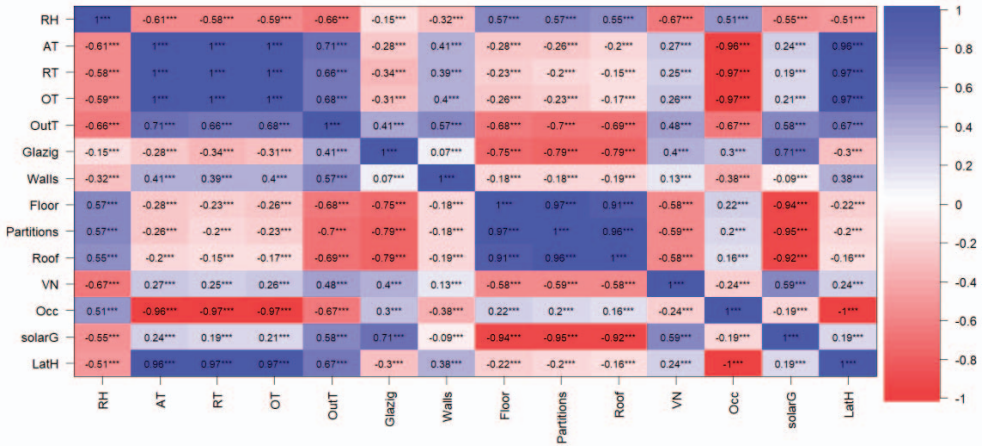


Fig. 6 Corrplot for the operation mode M2 (Off 24/7) using annual hourly results.

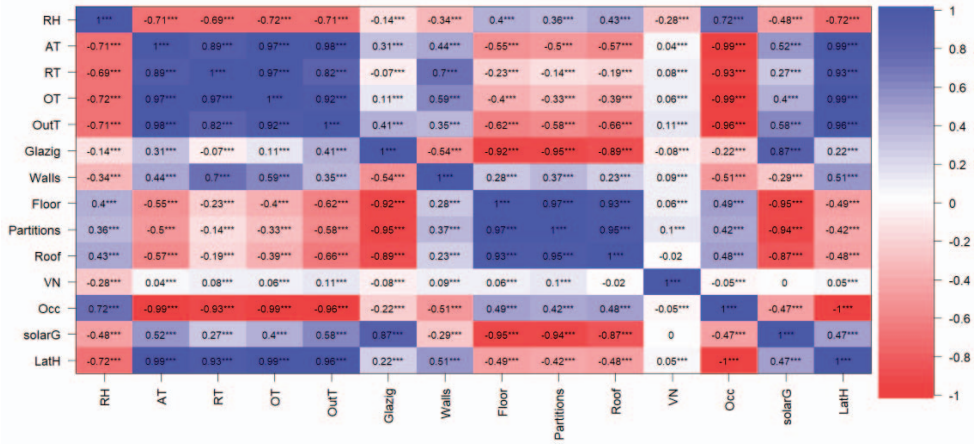


Fig. 7 Corrplot for the operation mode M1 (On 24/7) using annual hourly results. AT = Air temperature, RT = Radiant temperature. OT = Operative temperature.

contributes to cooling down the indoor air temperature, the other contributes to warming it up. However, the weak PCC values between the indoor air temperature (AT), radiant temperature (RT), and operative temperature (OT), and each envelope element, for all operation modes (Figures 5-8) support the sensitivity analysis results where the relative importance of the glazing, roof, floor, and partitions construction is insignificant (Fig. 3). On the contrary, the glazing type appears to be more important than the other envelope elements. Similar considerations were included in the thermal dynamics modeling of various cases of study both numerically and experimentally at different scales [13], [20]–[22]. The numerical studies [20]–[22] considered the thermal mass to be in equilibrium with the indoor air, thus, eliminating all envelope elements materials characteristics from the dynamic's description; convection heat transfer remains as the only interaction. The experimental and numerical study [13] agreed with the latter but evoked the importance of differentiating the convective heat exchange between the indoor air and each envelop element separately, hence going against the lumped parameter formulation considered in [20]–[22].

On the other hand, the AT, RT, and OT all possess strong direct relationships with the outdoor air temperature during the nocturnal operation mode M4, unlike the diurnal operation mode M3, where the correlation coefficient decreases. This may be explained by the fact that during the night, the only outdoor perturbation is the outdoor air, i.e., the indoor environment is subjected to the outdoor air dynamics if natural ventilation is effective. While during the day, the building is subjected to outdoor air and solar radiation. Solar radiation affects the radiant temperature, but this also depends on other factors. As for M1 and M2, visual similitudes can be noted between these modes and the nocturnal M4 and diurnal mode M3, respectively. For instance, the AT, RT, and OT obtain a strong direct correlation to the outdoor air temperature (OutT) when the windows are open at every moment and when the windows are open only during the night hours. If the windows are always open, it is expected that a parameter such as the outdoor air temperature would have a strong relationship with the temperatures inside the building; in the same way, if the windows are open mostly during nighttime, parameters such as the internal gains and solar gains acquired through the diurnal hours will offer a great contribution to the thermal potential between the already warmed building to the nocturnal cooled air. A parallel analysis can be made to support the previous one; the solar gains and the OT have a stronger direct relationship during the nocturnal mode M4 than in the diurnal mode M3. Then again, it is expected that the operative temperature increases during the day (Fig. 2) given the internal gains and other factors that will influence

the rate at which the indoor temperature increases; factors such as the heat that is transferred to the envelope elements such as the roof and the strong default relationship that the solar radiation will have on the radiant temperature, the heat will be transferred to the indoor air through convective heat transfer. Finally, if the windows are conveniently open during the coldest hours, such as in M1 and M4, the potential between the building that has already stored heat from the day and the outside air will be more significant.

It is also expected that the external wall construction (E.W.C) will acquire a higher level of importance with the increasing number of iterations used to execute the sensitivity analysis. The behavior observed of this parameter in the correlation analysis also displays changes in its interrelationship to other parameters throughout the execution of the four analyses with the four operation modes. The relationships between the walls and the other envelope elements are direct but not strong in the mode where the windows are open at every moment M1, albeit it remains direct. In the nocturnal mode, this relationship increases considerably. However, the relationship is inverse for the diurnal mode M3 and M2. This output can also be linked to the mode of operation itself, the fact that the windows remain open mainly during the hours when the outside air presents its lowest temperatures, increasing the thermal potential that the building's physical elements have, and the outdoor air temperature; the absence of a solid element such as the window allows for convective heat transfer to act on this potential through each envelope element, including the walls. Because this convective heat transfer happens without the restriction of a window or solid element, the decreasing temperature of the envelope elements will also be benefitted from a thermal potential between the walls and the elements. For modes where the windows are never opened M2 or are opened during the hours where the difference between the indoor and outdoor temperatures do not account for the sufficient thermal potential (M4), the internal gains will not be easily removed; the same will happen between the walls and the envelope elements.

It is essential to state that comfort levels are highly related to the thermal dynamics of a building and to the occupant itself. Passive design strategies such as passive cooling and ventilation, therefore, need to be highly associated with comfort levels to be implemented efficiently, specifically for cases where the focus is not numerically linked to the heat gains of a closed space but the tolerance levels of the occupant. The strategy often focuses on extending this tolerance level of comfort inherent to humans or occupants [23]. In an attempt to parametrize the thermal dynamics of occupants, which can change arbitrarily, the occupancy density (O.D.) represents a stochastic variable in the form of a probability density function in the sensitivity analysis' sampling.

The O.D., a parameter that presented noticeable changes in its level of importance throughout the sensitivity analysis (Fig. 3), lost significance when the number of iterations increased. On the contrary, the correlation analysis shows a strong inverse relationship between the temperatures formerly mentioned in every operation mode (Figs. 5-8) and the occupancy heat gains (Occ). Although these parameters, O.D. and Occ, are different, the latter's impact is directly related to the former. This presents a conundrum in whether or not to account for the occupants' heat gains in the thermal dynamics of the indoor environment. Such heat gains are difficult to estimate because of the occupant behavior, the activity they perform, and the level of clothing. In any case, this indicates that the activity the occupants are performing has a greater impact on the thermal dynamics of the indoor environment.

In summary, the coupling of both methodologies provides a potential mechanism for the parametrization process during the initial design phase, uncertainty, and correlation quantification, especially for physical parameters such as the envelope elements, which all present strong interrelationships to the glazing, another physical parameter.

The sensitivity and uncertainty analyses account for the variability in terms of parameter importance and each parameter's uncertainty as inputs over a desired output. Simultaneously, the correlation analysis provides numerical information on the interrelationships between these parameters, which may directly affect the uncertainty present in each input parameter. This can be mitigated by assessing the individual variability of each input parameter in the sensitivity analysis.

Simply put, the correlation analysis has the potential to answer questions related to the uncertainty produced by one individual input over the output, as accomplished in this research, or else by a particular parameter configuration over a specific desired output. This could extend the analysis into a more focused one where a local sensitivity analysis could provide even more insight into the variability and uncertainty of one single input over the output under conditions where the rest of the parameters are fixed. In this case study, the sensitivity analysis was globally applied to all the parameters and, in addition to the output provided by the prior correlation analysis performed. The coupled research was supported by an explanation of the thermal dynamics and the identified heat transfer mechanism behind the results provided by both the sensitivity and correlation analysis.

IV. Conclusions

The correlation analysis was advantageous to determining the most influential design variables, which will have a crucial contribution to the output, as seen in the sensitivity and uncertainty analysis. It is not only beneficial to corroborate the results gathered through the sensitivity analysis performed, but it also provides valuable insight that accounts for the interrelationship between variables and how they affect the output. These interrelationships, in the case of being strong enough to alter the value of the other variables, can motivate the designer to make decisions concerning variables that were previously not considered as influential as others. Addressing the importance of this interrelationship among variables is helpful in the process of decision-making at the initial design process, which is broadly studied in building performance simulation. It is also widely stated that it is a phase requiring much support in order to decrease the amount of uncertainty that is inherent to this phase itself, due to the amount of unknown information. While the sensitivity and uncertainty analyses already provide a quantified representation of the uncertainties in the simulation, the correlation analysis presented itself as a valuable tool to allocate the highest sources of uncertainty, i.e., addressing the high correlation between a design variable such as glazing and envelope elements can be helpful to assess the uncertainty in one of the highest ranked parameters in the

output of the sensibility analysis, corresponding to glazing type, and thus, the initial selection of the glazing type in the initial design phase.

Many of the parameters analyzed through all the methods revised in this research can be strategically selected to achieve a behavior less impacted by variables that had a strong relationship output in the correlation analysis and thus achieve a lower amount of model uncertainty in the building simulation. Even if this possibility appears to be achievable only through decisions related to the selection of physical parameters, such as variables related to the roof, the floor, and the partitions, all of which had multiple available values from the pool of options sampled by the sensitivity analysis, parameters such as site orientation or occupancy can also be carefully revised to increase or decrease interrelationships to the thermal behavior of relevant variables such as the glazing type or even the external window operation schedule. Some of these parameters, for example, the occupancy, had strong negative correlations to the incident temperatures of the building (AT, RT and OT) while having strong direct correlations to the envelope elements in the diurnal mode M4. This can lead to conclusions where the influence of the envelope materials over the occupancy and everything related to the occupant (comfort and occupancy density) is taken into consideration under specific conditions, such as the external window operation schedule as a fixed parameter, and thus extending the analysis to a more local or focused perspective. However, the occupancy is a parameter that presents high levels of uncertainty through the output; therefore, a bigger number of iterations is required to achieve a feasible level of accuracy in a design-oriented problem. Many other options can be considered in addition to the pool of available values that will partake in the sampling process executed by the sensitivity analysis. Consequently, the relationship that these parameters have with each other can initially contribute to a more thorough selection, even for cases where a hybrid mode of operation is considered, and the case study is initially set to be under completely passive cooling conditions as a starting point.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Research Group Energy and Comfort in Bioclimatic Buildings (ECEB, https://eceb.utp.ac.pa/) Faculty of Mechanical Engineering (https://fim.utp.ac.pa/) within the Universidad Tecnológica de Panamá (https://utp.ac.pa/) for their collaboration. This research was funded by Sistema Nacional de Investigación (SNI) and a Panamanian Institution Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT, https://www.senacyt.gob.pa/) under the projects code FIED19-R2-005 and FID18-056.

REFERENCES

[1] F. W. H. Yik and Y. F. Lun, "Energy Saving by Utilizing Natural Ventilation in Public Housing in Hong Kong," *Indoor and Built Environment*, vol. 19, no. 1, pp. 73–87, Feb. 2010, doi: 10.1177/1420326X09358021.

[2] B. Park and S. Lee, "Investigation of the Energy Saving Efficiency of a Natural Ventilation Strategy in a Multistory School Building," *Energies*, vol. 13, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13071746.

[3] T. Schulze and U. Eicker, "Controlled natural ventilation for energy efficient buildings," *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 221–232, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.044.

[4] A. K. Rivera, J. Sánchez, D. Mora, and M. C. Austin, "Inspection of the Identification of Thermal Modeling Process in Buildings: A Proposed Methodology for a Case Study in Tropical Climate," in *Advances in Automation and Robotics Research*, Cham, 2022, pp. 172–180. doi: 10.1007/978-3-030-90033-5_19.

[5] X. Meng, B. Wei, and Y. Zhai, "Sensitivity Analysis of Envelope Design Parameters of Industrial Buildings with Natural Ventilation," *Sustainability*, vol. 12, no. 24, Art. no. 24, Jan. 2020, doi: 10.3390/su122410288.

[6] A. Belleri, R. Lollini, and S. M. Dutton, "Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance," *Building and Environment*, vol. 81, pp. 123–138, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.009.

[7] H. Breesch and A. Janssens, "Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis," *Solar Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1453–1467, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.05.008.

[8] C. Carpino, R. Bruno, V. Carpino, and N. Arcuri, "Improve decision-making process and reduce risks in the energy retrofit of existing buildings through uncertainty and sensitivity analysis," *Energy for Sustainable Development*, vol. 68, pp. 289–307, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.04.007.

[9] C. J. Hopfe and J. L. M. Hensen, "Uncertainty analysis in building performance simulation for design support," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 10, pp. 2798–2805, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.034.

[10] J. Chen, G. Augenbroe, Q. Wang, and X. Song, "Uncertainty analysis of thermal comfort in a prototypical naturally ventilated office building and its implications compared to deterministic simulation," *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 283–294, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.068.

[11] W. Parys, H. Breesch, H. Hens, and D. Saelens, "Feasibility assessment of passive cooling for office buildings in a temperate climate through uncertainty analysis," *Building and Environment*, vol. 56, pp. 95–107, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.02.018.

[12] S. Senthilnathan, "Usefulness of Correlation Analysis," *SSRN Electronic Journal*, Jul. 2019, doi: 10.2139/ssrn.3416918.

[13] M. Chen Austin, "On the coupling between natural ventilation and sensible energy charge and discharge in buildings : an experimental and modeling approach," 2018.

[14] L. Liu, B. Lin, and B. Peng, "Correlation analysis of building plane and energy consumption of high-rise office building in cold zone of China," *Build. Simul.*, vol. 8, no. 5, pp. 487–498, Oct. 2015, doi: 10.1007/s12273-015-0226-7.

[15] C. Hopfe, "Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization," 2009.

[16] "DesignBuilder Software Ltd. About DesignBuilder. 2022. Available online: https://DesignBuilder.co.uk/about-us."

[17] M. Peel, B. Finlayson, and T. Mcmahon, "Updated World Map of the Koppen-Geiger Climate Classification," *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 4, Oct. 2007, doi: 10.5194/hess-11-1633-2007.

[18] *ASHRAE Standard 55-2020 - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.

[19] M. Chen Austin, D. Bruneau, A. Sempey, and L. Mora, *Statistical analysis of architectural features effects on indoor environmental conditions in a Plus Energy House prototype*. 2018.

[20] J. Yam, Y. Li, and Z. Zheng, "Nonlinear coupling between thermal mass and natural ventilation in buildings," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 7, pp. 1251–1264, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0017-9310(02)00379-4.

[21] D. Yang and Y. Guo, "Fluctuation of natural ventilation induced by nonlinear coupling between buoyancy and thermal mass," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 96, pp. 218–230, May 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.017.

[22] J. Zhou, G. Zhang, Y. Lin, and Y. Li, "Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 6, pp. 979–986, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.08.001.

[23] M. Santamouris and D. Asimakopoulos, *Passive Cooling of Buildings*. Earthscan, 1996.

Effect of thermal hydrolysis for the inactivation of fecal coliforms present in the sludge of the Panama Wastewater Treatment Plant

Efecto de la hidrolisis térmica para la inactivación de los coliformes fecales presentes en los lodos de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Panamá

Adis Salinas
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
Universidad de San Carlos
Guatemala, Guatemala
adis.salinas1809@gmail.com

Marian Ramirez
Grupo de Biosólidos, Energía y Sostenibilidad
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
marian.ramirez@utp.ac.pa

Euclides Deago
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
kleveer.espino@utp.ac.pa

Kleveer Espino
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
kleveer.espino@utp.ac.pa

***Abstract*— During the treatment of wastewater, residual sludge is generated, which is difficult to manage, which is why, through time, different processes have been sought to stabilize it in order to obtain a usable product that is not a danger to health and the environment. The commonly used process is anaerobic digestion, the Panama City (WWTP) has implemented an additional sludge preconditioning process known as thermal hydrolysis worldwide. This research sought to evaluate the effect of thermal hydrolysis on the inactivation of fecal coliforms present in hydrolyzed sludge, where 90% inactivation was obtained, compared to non-hydrolyzed sludge, taking as a reference the technical standard DGNTI-COPANIT 47-2000.**

Keywords—Hydrolyzed sludge, fecal coliforms, bacteries

***Resumen* — Durante el tratamiento de las aguas residuales se generan lodos residuales, el cual es un subproducto de difícil gestión, razón por la cual a través de los tiempos se han buscado distintos procesos que buscan estabilizarlos con el fin de obtener una materia prima aprovechable y que no sea un peligro para la salud y el medio ambiente. Con el interés de preacondicionar y aprovechar los lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Ciudad de Panamá; Se ha implementado un proceso adicional en la línea de lodos conocido mundialmente como hidrolisis térmica. Esta investigación buscó evaluar el efecto de la hidrolisis térmica en la inactivación de los coliformes fecales presentes en los lodos hidrolizados, donde se obtuvo un 90% de inactivación, comparados con los lodos sin hidrolizar tomando como referencia la norma técnica DGNTI-COPANIT 47-2000.**

Palabras claves —lodos hidrolizados, hidrolisis, bacterias, coliformes fecales

I. INTRODUCCIÓN

Los lodos residuales municipales y domésticos tienen gran cantidad de bacterias de coliformes generalmente fecales y patógenos, los cuales deben removerse para evitar los riesgos a la salud y la contaminación ambiental, además de poder aprovecharlos como un subproducto. [1]

La PTAR de la Ciudad de Panamá, ha manejado en promedio una producción de 80 toneladas diarias de lodos estabilizados con cal; esto representa un problema de salud pública y ambiental ya que los mismos son dispuestos en el relleno Sanitario de la Ciudad de Panamá, Cerro Patacón [2]. Desde el año 2022 con la construcción del módulo 2, la PTAR ha incluido la hidrolisis térmica como un proceso adicional; la línea de tratamiento de lodos del módulo 1 funcionaba con una tecnología convencional que incluía los siguientes procesos: preespesamiento a gravedad, predeshidratación utilizando mesas espesadoras, digestión anaeróbica y deshidratación [2]

Actualmente, la PTAR incluye dentro de sus procesos de la línea de lodos las siguientes etapas: preespesamiento a gravedad, predeshidratación, hidrolisis térmica, digestión anaeróbica y deshidratación (Figura 1) [3]. La variante de hidrólisis térmica es un proceso que promete grandes beneficios en el tratamiento de los lodos, como lo son reducción de volumen, mayor producción de biogás, inactivación de patógenos, entre otros. [4]

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00087

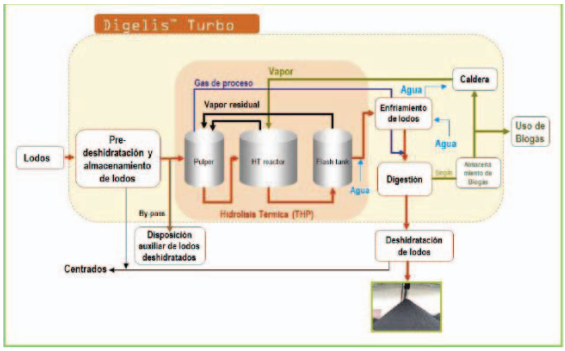


Fig. 1. Procesos de tratamiento de la línea de lodos en la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Panamá. *[3]*

La hidrólisis térmica es un proceso de acondicionamiento de lodos que se aplica como un pretratamiento antes de la digestión anaeróbica, consiste en someter el lodo a elevada presión y temperatura durante un tiempo establecido, con el objetivo de conseguir la ruptura de estructuras que componen el lodo, incrementando su biodegradabilidad. [4] La PTAR de la Ciudad de Panamá utiliza tecnología CAMBI, compañía fundada en 1995 [5], consta de tres unidades básicas: el pulper, el reactor y el flash tank. Debido a su diseño en capacidad a tratar incluye 3 reactores en funcionamiento continuo.

La Hidrólisis térmica consiste en un sistema donde los residuos deben ser previamente deshidratados a un rango del 12% al 16% antes de ser transferido a un silo o contenedor que sea lo suficientemente grande como para proporcionar ecualización de las variaciones de flujo de entrada que permiten que el proceso de Hidrólisis Térmica (THP) opere a un caudal uniforme. Cuando los residuos se introducen en el sistema, primero se transfieren al pulper a través de sinfines en la parte inferior del depósito de almacenamiento y las bombas. Los residuos se mezclan en el pulper y se precalientan con vapor que se recicla del flash tank. Los residuos precalentados son bombeados al recipiente del reactor donde se calentará a aproximadamente 329°F (165°C) y a una presión aproximada de 120-130 psi. Después del tiempo de hidrolización adecuado, el lodo es transferido del reactor al flash tank. El tiempo de retención variara de acuerdo con el tipo de lodo a tratar. El flash tank recibe los lodos hidrolizados tratados con una concentración de sólido aproximadamente un 3-4% menos que el lodo preespesado debido a la inyección de vapor y la dilución. El CAMBI de la PTAR de la ciudad de Panamá opera a una temperatura de 165°C y un tiempo de retención de 30 minutos. [3]

La temperatura de los lodos residuales que salen del flash tank es demasiado alta para alimentar un digestor mesofílico; por lo que se requiere su enfriamiento y dilución. El agua utilizada para la dilución baja la concentración de los lodos entre 6 a 12% para alimentar al digestor. La temperatura también debe reducirse a aproximadamente 35° C utilizando intercambiadores de calor. [3]

Dicho de otra manera, la hidrólisis es la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómeros y dímeros) que son capaces de atravesar la membrana celular, este proceso se lleva a cabo por medio de enzimas denominadas hidrolasas, que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas. [13]

La degradación anaerobia principalmente se da en polímeros como celulosa y hemicelulosa, con la participación de enzimas celulasas. De esta enzima se conocen tres tipos: endocelulosa, encargadas de romper los enlaces 1,4-β glucosídicos internos del polímero para convertirlo en moléculas más pequeñas; oxicelulosas encargadas de romper los enlaces 1,4-β glucosídicos de los polímeros reducidos por las endocelulasas obteniendo tetrámeros o dímeros y, por último, las celobiasas o β-glucosidasas las cuales hidrolizan las moléculas resultantes de la última hidrolisis en dos moléculas de glucosa. [14]

Para llevar a cabo la biodegradación, ciertos microorganismos secretan diferentes tipos de enzimas, llamadas enzimas extracelulares que "cortan" moléculas grandes en pedazos más pequeños para que los microorganismos pueden tomar dentro de la célula y utilizarla como una fuente de energía y nutrición. Los microorganismos que rompen diferentes azúcares son llamados sacarolíticos, mientras que los que rompen proteínas son llamados proteolíticos. [15]

TABLA 1. MICROORGANISMOS ANAEROBIOS ENCONTRADOS EN DIFERENTES RANGOS DE PH [14]

pH	Tipo de microorganismo	Microorganismos encontrados
1.1-5.5	Acidófilos	Lactobacillus spp Bifidobacterium bifidum
5.5-8.0	Neutrófilos	Clostridium perfringes Methanococcus sp Methanobacterium sp Propionibacterium acidipropionici
8.5-11.5	Alcalonofilos	Clostridium botulinum Clostridium sporongenes Clostridium tetani Fusobacterium spp Micrococcus spp

Entre los beneficios que trae la utilización de este proceso están: obtener un lodo que cumpla con categoría Tipo A según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) [6] y que cumpla con el Reglamento Técnico Norma de Uso y Disposición de Lodos (DGNTI-COPANIT 47-2000) de la Ciudad de Panamá, en donde se indica que los coliformes fecales deben estar por debajo de los 2000 UFC/100 ml.

Los agentes microbiológicos presentes en los lodos residuales son bacterias, virus, protozoos, trematodos, cestodos, nematodos, según la Organización Mundial de la Salud. [7] En este sentido, para que cualquier vertido de

lodos sea seguro, se precisa su eliminación o al menos una inactivación suficiente de patógenos. Es por esto, que dentro de la línea de lodos de una PTAR existen fases de estabilización como: la digestión anaerobia, aerobia, la estabilización con cal, tratamientos de preacondicionamiento como la hidrolisis térmica, entre otros.

Dicho esto, este estudio busca evaluar el efecto de la hidrolisis térmica, para la inactivación de los coliformes fecales presentes en los lodos hidrolizados de la PTAR de Panamá.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestreo

En este estudio se analizó los lodos preespesados obtenidos luego de ser predeshidratados, y los lodos hidrolizados obtenidos luego de pasar por la hidrolisis térmica con el fin de poder realizar una evaluación del efecto que tiene incluir este proceso. Estos lodos fueron muestreados, transportados y almacenados siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica DGNTI- COPANIT 47-2000. Todos los análisis se hicieron en Laboratorio de Sistemas Ambientales del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá.

Las muestras fueron tomadas durante 10 días continuos y se analizaron en un periodo mínimo de 4 horas. Se utilizaron envases esterilizados con el fin de evitar contaminación cruzada.

B. Métodología

La capacidad de reproducción y sobrevivencia de las bacterias dependen principalmente de las condiciones de pH, temperatura y tiempo de retención en el proceso utilizado. [8]

- **Determinación de pH:** Para la determinación de pH del lodo residual se obtuvo haciendo una dilución 1:10. Se midió el pH utilizando un potenciómetro portátil utilizando la norma ISO 10390-2005. [9]

- **Determinación de coliformes fecales:** La presencia de coliformes fecales consistió en la dilución de la muestra de $10^{-1,}$ se hizo un duplicado para cada muestra para el control de calidad, y se utilizó la técnica de número más probable de la norma ISO 9308-2:2012 método Colilert 18/Quanti Tray. [10]

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de pH luego de ser hidrolizado se encuentran en un rango de 5.5 a 6 (Figura 2), lo cual nos confirma que el proceso de hidrolisis térmica ha ocurrido como lo indica la literatura (Figura 3) sobre los procesos de la digestión anaerobia indicando que se encuentra en un pH en donde las bacterias pasaran al siguiente proceso de acidogénesis. La disminución del pH durante este proceso favorece la eliminación de bacterias y tal decremento es debido a la descomposición de la materia orgánica que se da en la hidrolisis térmica. La temperatura condiciona el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos. Al subir la temperatura utilizando un proceso de hidrolisis térmica por encima de la temperatura máxima de crecimiento de las bacterias, las bacterias dejan de ser capaces de crecer y dividirse. Lo que provoca la muerte por calor.

TABLA 2. RESULTADOS DE PH EN LODOS PREESPESADOS E HIDROLIZADOS

Lodo Preespesado	Lodo Hidrolizado
6.46	6.11
6.8	5.61
6.73	5.85
6.97	5.77
6.4	5.78
6.23	5.79
6.57	5.75
7.15	5.97
7.36	6.45
6.95	5.56

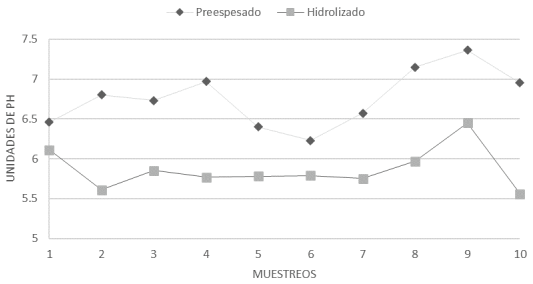


Fig. 2. Resultados de pH en lodos preespesados e hidrolizado.

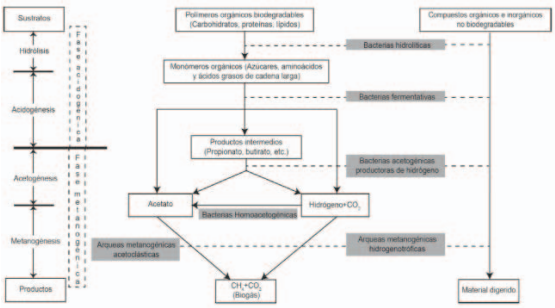


Fig. 3. Procesos de la digestión anaerobia. *[11]*

En cuanto a los resultados de coliformes fecales de 10 muestras (tabla 3) tenemos que en un número de muestras N = 10, N = 6 presentaron la inactivación total en coliformes fecales. Para un número de muestras de N = 2 estuvieron por arriba del límite de rango permitido, sin embargo, también presentaron una disminución por arriba del 90%.

TABLA 3. DISMINUCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN LAS MUESTRAS

Número de Muestra	Disminución de Coliformes Fecales (%)
1°	91.17
2°	100.00
3°	100.00
4°	99.97
5°	100.00
6°	98.80
7°	99.93
8°	100.00
9°	100.00
10°	100.00

Los coliformes fecales son tolerantes a altas temperaturas (44°C) y son indicadores por excelencia de contaminación fecal. Su presencia debe ser interpretada como indicadora probable de presencia de bacterias patógenas. [12]

TABLA 4. EJEMPLOS DE PUNTOS TÉRMICOS MORTALES PARA CIERTAS ESPECIES. [8]

Punto Térmico Mortal	Especie
55°C	Escherichia coli
60°C	Mycobacterium tuberculosis
120°C	Endosporas de especies muy resistentes de Bacillus

Las bacterias denominadas coliformes se tratan de especies entérica, no esporógenas, gramnegativas y anaeróbicas facultativas o aeróbicas. Por lo general, se encuentran en los intestinos de animales de sangre caliente y en los seres humanos, aunque también pueden encontrarse en plantas y en el suelo. [16] Lo habitual es que estas bacterias lleguen al medio ambiente a través de deposiciones de animales y personas, por lo que lo convierte en un indicador de contaminación fecal. En la investigación realizada podemos ver la comparación de los resultados en coliformes fecales para ambos tipos lodos. (Figura 4).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reconocido a los coliformes fecales como un indicador fecal [12]. Este indicador proporciona un espectro de las enfermedades transmitidas a través de los lodos. Determinando su grado de eliminación se podría determinar la eficiencia de remoción de tratamiento utilizado.

Desde el punto de vista de la salud pública esta diferenciación es importante puesto que permite asegurar con alto grado de certeza que la contaminación presente es de origen fecal. En esta investigación todas las muestras analizadas de lodos preespesados tienen alto contenido de coliformes fecales en un rango de 10^6 (Figura 4), contaminados con organismos patógenos causante de enfermedades.

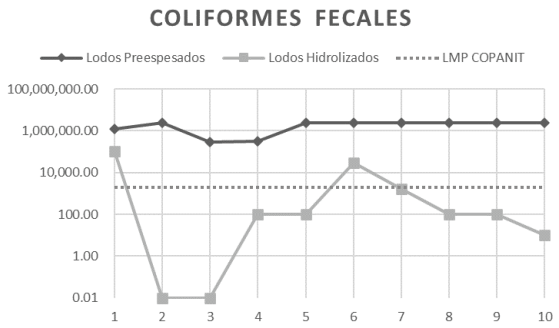


Fig. 4. Resultados de Coliformes Fecales

Los lodos preespesados tienen un rango de 10^6 en NMP/100 mL, la hidrolisis térmica logra la reducción a 0 en NMP/100 mL demostrado en 6 de las 10 muestras tomadas. (Tabla 3).

Al analizar las muestras para lodos hidrolizados se visualizó que existe una disminución de al menos el 90% en coliformes fecales. La mayoría de las muestras están por debajo del límite máximo permisible permitido por la COPANIT 47-2000 [17], para poder utilizar los lodos en abono o actividades agrícolas. (Figura 4) [18].

IV. CONCLUSIÓN

Al estudiar la PTAR de la Ciudad de Panamá se pudo confirmar con la disminución del pH en las muestras tomadas que al utilizar la hidrolisis térmica estamos adelantando el proceso de hidrolisis que se da naturalmente en el digestor anaeróbico debido a la secuencia metabólica de los grupos microbianos.

Se encontró que la mayoría de las muestras presentaron una inactivación significativa en coliformes fecales. Esto nos abre las puertas para futuras investigaciones ya que el lodo producido en la PTAR de la Ciudad de Panamá podría ser catalogado como Tipo A según la EPA para ser utilizado como abono o cualquiera actividad agrícola cumpliendo también con la reglamentación vigente en la ciudad de Panamá (DGNTI-COPANIT 47-2000).

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los encargados de la PTAR de la Ciudad de Panamá por su disposición para la toma de muestras de los lodos. Al grupo de investigación de Biosólidos: Energía y Sostenibilidad del Centro de Investigaciones hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá por brindar el apoyo con el laboratorio y el acompañamiento durante la investigación. Además, agradecer a la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación por el financiamiento del proyecto IDDSE19-008 “Codigestión anaeróbica de biosólidos de aguas residuales y desechos orgánicos municipales como alternativa energética sostenible”;

además, agradecer al Sistema Nacional de Investigación (SNI), por el apoyo brindado.

VI. REFERENCIAS

[1] J. G. L. Macías, Los Lodos de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Problema o Recurso?, Guadalajara, Jalisco, 2013.

[2] Programa Saneamiento de Panamá, "Programa Saneamiento de Panamá," 2017. [Online]. Available: https://saneamientodepanama.gob.pa/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-ciudad-de-panama/#tab-id-5. [Accessed 2022].

[3] Suez International S.A, Memoria Tecnica PTAR, Panamá, 2019.

[4] En Segundos, "Módulo II de planta de tratamiento de aguas residuales tiene 92% de avance," 25 julio 2022. [Online]. Available: https://ensegundos.com.pa/2021/07/09/modulo-ii-de-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-tiene-92-de-avance/. [Accessed julio 2022].

[5] P. M. Arroyo, "Tecnologías comerciales de hidrólisis térmica," Valladolid, España, 2015.

[6] United States Environmental Protection Agency (EPA), "Basic Information about Biosolids," United States, 2022.

[7] G. 1. Organización Mundial de la Salud, "Directrices Sanitarias sobre el uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura," España.

[8] E. Lañez, "Microbiologia General," 9 mayo 2005. [Online]. Available: https://www.ugr.es/~eianez/Microbiologia/index.htm.

[9] ISO, "ISO 10390:1994, Soil quality — Determination of pH," 1994.

[10] I. 9308-2:2012, "Water quality — Enumeration of Escherichia coli and coliform bacteria — Part 2: Most probable number method," 2012.

[11] L. Cárdenas, B. Parra, P. Torres and C. Vásquez, "Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM," p. 97, 2016.

[12] Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad del agua potable," Ginebra, 1995.

[13] Y. Han, Y. Zhuo and D. Peng, Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation, Xian. China: School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,, 2017.

[14] L. C. Corrales, D. Romero, J. Bohórquez and A. Corredor, Bacterias anaerobias: procesos que realizan y, Bogota: NOVA, 2015.

[15] R. Parra, "Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria," Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, 2015.

[16] J. A. Larrea, M. M. R. Badía and B. Romeu-Ávarez, "Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura," Habana, Cuba, 2012.

[17] Dirección General de Normas y Tecnología Industrial, "DGNTI-COPANIT47-2000, Agua, Usos y Disposición Final de Lodos," Panamá, 2000.

[18] J. Mihelcis, "Sludge Managmente: Biosolids and fecal Sludge," Universidad del Sur de Florida, Tampa, Estados Unidos.

Reuse of Effluents from the Victor Levi Sasso Campus Wastewater Treatment System, UTP for Irrigation of Green Areas

Reúso de Efluentes de la Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Campus Victor Levi Sasso, UTP para Riego de las Áreas Verdes

Yorett, Geraldine[1], Noel Job[2], Deago Euclides[2], Vallester, Erick[1]
1. Faculty of Civil Engineering – Universidad Tecnologica de Panama
2. Hydraulic and Hydrotechnical Research Center - Universidad Tecnologica de Panama

***Abstract*—**As time goes by, the problem of global water scarcity increases, and Panama does not escape this reality. According to the World Health Organization (WHO), the reuse of effluents from Wastewater Treatment Systems (WWTS) as a mitigation measure has gained great popularity in recent years, promoting the development of circular economies and ensuring the distribution of drinking water. for the necessary activities. Currently, around 50,000 L/week of drinking water is used to irrigate the green areas of the Dr. Victor Levi Sasso, UTP campus, in the dry season. For this reason, our objective is to demonstrate the feasibility of reusing effluents from the WWTS for irrigation of the green areas of the campus by comparing the water demand of the area and the production of the WWTS. The results show that the WWTSx of the Dr. Victor Levi Sasso Campus 470,880 L/week is capable of supplying the water demand for the irrigation activity of the green areas of the campus 50,000 L/week. In conclusion, the reuse of these effluents would not only represent an economic benefit for the institution, since the production costs of treated water are lower than that of drinking water, but the implementation of this measure would encourage the Technological University to enter the category of universities worldwide that join the fight against climate change by implementing an environmental plan for the reuse of water

Keywords— Irrigation, reuse of water, SDG, sustainability, wastewater

Resumen — Con el pasa el tiempo, el problema de escasez de agua a nivel mundial aumenta y Panamá no escapa esta realidad. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el reuso de efluentes de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) como medida de mitigación ha ganado gran popularidad en los últimos años impulsando el desarrollo de economías circulares y asegurando la distribución de agua potable para las actividades necesarias. Actualmente, alrededor de 50,000 L/semana de agua potable son utilizados para el riego de las áreas verdes del campus Dr. Victor Levi Sasso, UTP, en la época seca. Es por esto que nuestro objetivo es demostrar la factibilidad del reuso de efluentes de la STAR para el riego de las áreas verdes del campus mediante la comparación de la demanda hídrica del área y la producción del STAR. Los resultados demuestran que el STAR del Campus Dr. Victor Levi Sasso **470,880 L/semana** es capaz de suplir la demanda hídrica para la actividad de riego de las áreas verdes del campus 50,000 L/semana. En conclusión, el reuso de estos efluentes no solo representaría un beneficio económico para la institución, puesto que los costos producción de agua tratada son más baja que la del agua potable, sino que la implementación de esta medida impulsaría a la Universidad Tecnológica a entrar a la categoría de universidades a nivel mundial que se unen a la lucha contra el cambio climático mediante la implementación de un plan ambiental para el reuso de aguas.

Palabras claves — **Aguas residuales, irrigación, ODS, reuso de aguas, sostenibilidad**

I. Introduction

As time goes by, the problem of water scarcity increases, currently a fifth of the world population lives in areas that face this problem [1]. As far as Latin America and the Caribbean region is concerned, about 77 million people struggle with the direct effects of scarcity and poor management of water resources [2]. When it comes to Panama, in the recent years, the country's scenario of abundance has been called into question due to rapid population and economic growth; in addition to the adverse effects of climate change, so that conditions of apparent scarcity are already present. Particularly in rural and peri-urban areas with low or non-existent public investment in water security. [3]

This situation of water scarcity has generated a paradigm shift. According to the WHO, the reuse of WWTS effluents for activities such as irrigation of green areas, cleaning of public spaces, etc. has gained great popularity in recent years as a mitigation measure against the problem of water scarcity [4] [5].

For example, now days there are several universities worldwide that implement the reuse of WWTS effluents for the irrigation of green areas as a mechanism for the sustainable management of water resources:

- For almost four decades, Penn State University, United State has reused all its wastewater effluents to irrigate its forests, crops, and recharge aquifers through its Living filter system [6];
- Quaid-i-Azam University, Pakistan is currently treating their wastewater through constructed wetlands to reuse

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00088

them for the irrigation of green areas on campus; In addition, this project is used as a pilot plan for its possible implementation in other universities nearby área [7];

- Emory University, United States currently has a wastewater treatment system based on constructed wetlands called "THE WATERHUB". This system helps the university reduce about 40% of the total demand for water on campus. [8];
- The University of Applied and Environmental Sciences, Colombia has a wastewater reuse plan tat allows them to take advantage of 70% of the treated wastewater [9].

The objective of this research is to demonstrate the feasibility of reusing treated wastewater effluent from the WWTS of the Dr, Victor Levi Sasso Campus, Universidad Tecnologica de Panama. The reuse focuses on the irrigation of green areas as a mechanism to reduce stress on the generation of potable water and the transition of our campus to a more environmentally sustainable future.

II. PROBLEM STATEMENT

One of the main causes of water scarcity worldwide lies in the irrational use of this resource. According to data provided by the Department of Green Areas of Universidad Tecnologica de Panama [10], around 231,336 L/week of groundwater are used for irrigation of green areas during the dry season. In contrast, according to Barrera, L. et. al., around 407,880 L/week of effluents from the campus STAR are discharged into the Curundú River, without taking into account the benefits that the reuse of this offers the institution in its efforts to implement sustainable methodologies and promote the development of a circular economy and the country in its efforts to reduce the growing scarcity of water, a product of Climate Change and the deficient use of water resources. [11]

III. LEGAL FRAMEWORK

Currently, effluent discharges from Dr. Victor Levi Sasso's WWTS are regulated by the DGNT-COPANIT 35-2000, which establishes the permissible limits that effluents must meet before being discharged in the Curundu River. Another standard that must be taken into consideration is DGNTI-COPANIT 24-99, which establishes the permissible parameters for the reuse of WWTS effluents

IV. MATERIALS AND METHODS

At first, extensive bibliographic research was made on the subject. At the same time, the Department of Green Areas of Universidad Tecnologica de Panama was asked for the following information: 1). green areas that are currently irrigated, 2). amount of groundwater water (L/week) used for irrigation of green areas, 3). Type of irrigation system used on campus.

A sample of the wastewater coming from the septic tank located in the Campus Dr. Victor Levi Sasso, UTP was taken in July 2022 to know the value of certain chemical parameters of the effluent that could influence the flora's growth.

According to several researchs public acceptance is key for the reuse of wastewater, therefore, between June 2022 and July 2022 a survey was made to know the acceptance level on campus for the reuse of wastewater for irrigation of the green areas using google form. The survey covered the most important questions regarding the reuse of wastewater with it comes to activities that have limited contact with human beings [12] [13]

A comparative analysis was carried out between the water demand in the most critical season of the year vs. the offer of Campus Dr. Victor Levi Sasso's WWTS to verify the feasibility of the mechanism under study, once confirmed, we did a comparison between the DGNTI-COPANIT 24-99 standards, and the values obtained from the sampling carried out to suggest possible treatments for the effluent before being reused and a economic analysis to verify it there were economic benefits. Finally, an implementation plan was made to establish the storage mechanisms for treated water and its distribution throughout the campus.

V. AREA OF STUDY

5.1 Description of the area

The Dr. Victor Levi Sasso campus located in Panama City, has approximately 64 Ha of green areas, of which around 1.86 Ha are irrigated according to data provided by the Campus Green Areas Department (**figure 1**). Among the areas contemplated is the Aljibe, the soccer field, the nursery and the Pythagoras [14]

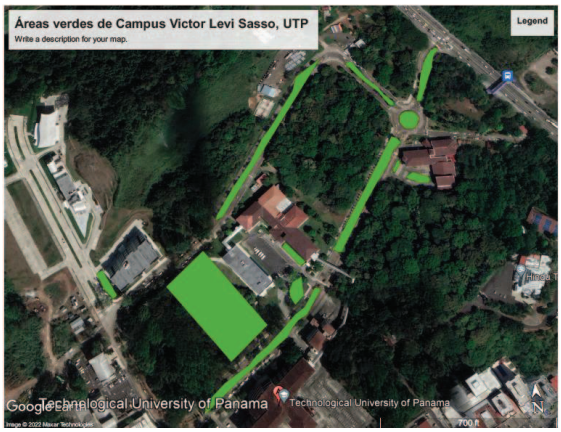
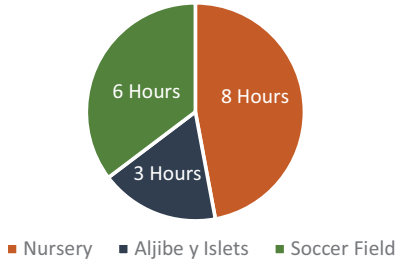


Figure 1. Green areas of Campus Dr. Victor Levi Sasso, UTP
Source: Google Earth, 2022

5.2 Calculation of water demand

According to data provided by the Department of Green Areas of the Universidad Tecnologica de Panama, the irrigation system works around 17 hours/week, divided as shown in **graph 1**



Graph 1. Cronograma de riego en áreas verdes, UTP
Source: Abrego, Agustin (2022)

Note: 60 gallons of water are used per minute for irrigation.

Qdemand = 17 hours/week x 60 min/hour = 1,020 min/week (1)
Qdemand = 1,020 min x 60 gallons = 61,200 gallons/week
Qdemand = 61,200 gallons/week x 3.78 L/gallon

Qdemand = 231,336 L/week week

5.3 Supply of wastewater in the STAR

According to Barrera, L., et al, the average flow handled by the STAR of the Dr. Víctor Levi Sasso campus is 1.09L/s [11] during the high season, so the weekly flow would be as follows:

Weekly Flow = 1.09L/s* 86,400 s/days* 5 days/ week (2)
Weekly Flow = 407,880 L/weekly

5.4 Calculation of fertilizer's expenses

According to data provided by the Department of Green Areas of the Universidad Tecnologica de Panama, every 7 months, about 4 quintals of nitrogen fertilizer (00-0-46) are used for the maintenance of the soccer field and about 3 quintals of D 12-24-12 fertilizer is used for the maintenance of the rest of the green areas in campus.

According to data provided by the National Institute of Statistics and Census of Panama, by 2020, the average price for quintal of nitrogen fertilizer (00-0-46) in Panama City was $25.25, while by 2019, the 12-24-12 fertilizer's average price was $24.80 in Panama City. [15] [16]

Table 1. Fertilizer expenses

Fertilizer	Amount (quintals)	Unit price	Total price
00-0-46	4	$25.25	$101.00
12-24-12	3	$24.80	$74.40
TOTAL			$175.40

Source: National Institute of Statistics and Census Panama

VI. RESULTS

6.1 Water demand vs WWTS supply

The reuse of effluents from the STAR of the Dr. Victor Levi Sasso Campus is feasible since the water demand for irrigation in the most critical season (231,336 L/week) is less than the maximum effluent production of the STAR (470,880 L/week). As a result, the demand for the irrigation of green areas can be satisfied without any problem throughout the whole year, contrary to the problem the current system is facing due to unstable groundwater levels.

6.2 Economic analysis

According to data provided by the Department of Green Areas of the Universidad Tecnologica de Panama, current groundwater levels aren't enough for the irrigation of green areas during our dry season, so a second well is needed in order to cover the water demand for the irrigation of green areas, the price for this structure would be about $3,301.94, additionally, two fertilizer's mixer tanks are needed in order to provide the right amount of fertilize to each area; Additionally, regular monitoring of the tank's effluent should get done in other to check if fertilizer's concentrations are rights.

Compared to the current irrigation system, the reuse of treated wastewater only needs the construction of a storage tank, which price is approximately $2,500.00, no mixer tank is needed since the effluent already brings a high percentage of the nutrients needed for the green areas. Unlikely the current system, no additional wastewater treatment system would be needed in the long run since the current system provides more than the current demand.

Table 2. Green area's irrigation expenses comparative analysis

Fertilizer	Current system	New System
Fertilizer expenses	$300.69	Yet unknown
Water supply's Structure	$3,301.94*	$3,000.00
Fertilizer's concentration analysis	$250.00	$0.00
Total	**$3,852.63**	**$3,000.00**

*This structure is subjected to groundwater availability in the current well, so if the water demand exceeds the system's current offer, new wells will be needed in the future.

As shown in **table 2,** the reuse of effluents from the STAR could represent a significant reduction on the University's yearly expenses.

6.3 Possible treatments

Table 1 shows a comparative analysis between the current values of the effluents from the WWTS from high season (march-December) in campus and the values with which they must comply for their reuse in accordance with the DGNTI-COPANIT 24-99 standard. As can be seen, most of the parameters taken into consideration for the reuse of treated wastewater are outside of the limits establish by the standards. [17]

According to the comparative analysis and considering that the samplings came from the septic tank, a primary water treatment, the effluents from the Campus Dr. Victor Sasso shall go through a secondary treatment to comply with the DGNTI-COPANIT 24-99 standard. The treatment of these waters through a system of constructed wetlands, as a secondary and even tertiary treatment, would help reduce parameters such as total Solids, COD, DBO_5 and total coliform in an economic and efficient way [18] [19] [20]

Additionally, constructed wetlands are considered green infrastructures due to its low maintenance prices, low energy usage and minimum space needed to treat wastewater when compared with traditional wastewater treatment such as wastewater treatment plants, activate sludges, waste stabilization pond, etc., [21]

Table 2. Comparative analysis: WWTS effluents vs DGNTI-COPANIT 24-99

Parameters	Units	WWTS effluents (high season)	DGNTI-COPANIT 24-99
pH	Units	7.09	6.0 – 9.0
Conductivity	µsiemens/ cm	635	
Nitrate	$mgNO_3^-/L$	10.6	-
Nitrite	$mgNO_2^-/L$	0.057	-
DBO_5	mgO_2/L	83.6	<40
COD	mgO_2/L	192.4	-
Ammonium	$mhNH_4/L$	60.9	-
Total suspended solids	mg/L	372	<40
Suspended solids	mg/L	-	
Total nitrogen	mgN/L	46.4	-
Total coliforms	UFC/100 mL	$5.8*10^6$	<200

Source: Water and Wastewater Treatment, S.A.

6.2. Level of acceptance

According to Tarik Chfadi, et. Al. one the main concern about the reuse of treated wastewater worldwide is the level of acceptance among people [12]. A survey was taken by 150 people that included students, professors, administrative staff, and researchers as shown in **figure 2** in order to know the level of acceptance for the reuse of treated wastewater on campus.

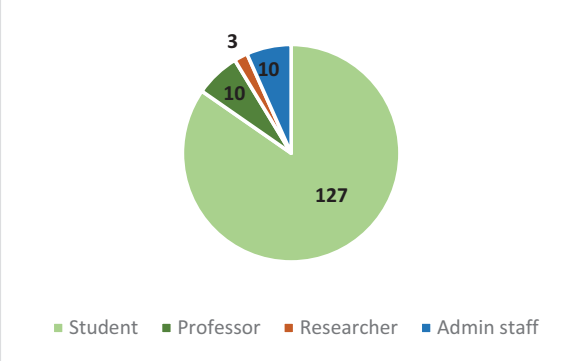


Figure 2. Survey's sample distribution
Source: Yorett, Geraldine (2022)

Results from the survey shows that 97% of the sample would accept the reuse of treated wastewater on campus. From this 134 people would agree to use the treated wastewater for the irrigation of the green areas while 115 people would agree to use it for the cleaning of public spaces such as parking lots and parks and 53 people would agree to use it as part of the cooling system as shown in **figure 3**

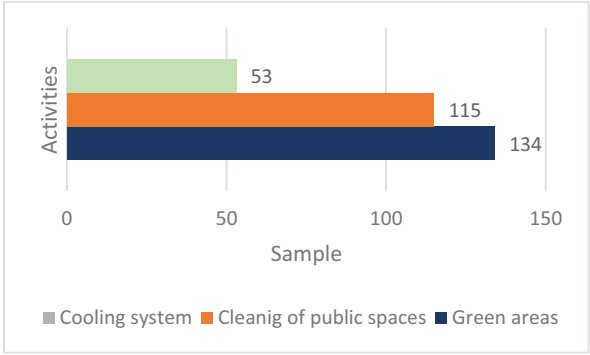


Fig. 3. Acceptable activities for the reuse of treated wastewater according to the campus' users
Source: Yorett, Geraldine (2022)

Lastly, 148 people would agree to reuse the treated wastewater if its's as a as a mechanism for the sustainable management of water resources.

6.3 Logistic plan

For the irrigation of green areas, the construction of a water storage structure with a capacity to store up to 18,000 L is recommended to store the effluent once it is treated. Said structure must be connected to the sprinkler irrigation system that is currently used. The logistics for the reuse of effluents from the STAR will follow the order shown in **figure 4**

Figure 4. Logistic plan for the irrigation of green areas on campus
Source: Yorett, Geraldine (2022)

VII. BENEFITS OF WWTS EFFLUENTS REUSE

7.1 Economic benefits

- Since the Dr. Victor Levi Sasso Campus has its own low energy consumption wastewater treatment system, the production of wastewater will always be less than the production of drinking water (from B/.0.71 to B/.1.81 per thousand gls) [22], so the reuse of effluents from the STAR could means a

significant decrease in expenses for the institution and the government.

7.2 Environmental benefits

- Reduction of stress in sensitive ecosystems due to the reduction in the consumption of fresh water [23];
- Reduction of pollutants in the Curundu river due to the reduction of discharges from the WWTS located on campus;
- Decrease in the use of chemical fertilizers for the maintenance of green campus areas since the effluents from the STAR have nutrients (phosphorus, nitrate, etc.) required for the growth of vegetation;
- The effluents from the WWTS, being an increasing water resource, would be available for activities throughout the year, unlike drinking water.

7.3 Social benefits

- The surplus of drinking water that was previously used to carry out these activities could be used to improve the quality and quantity of drinking water, thus improving the lack of vital liquid in this area;
- Our campus is greatly known for being a natural oasis among the chaos of the city, having well irrigated green areas could improve the campus's user's mental health.

7.4 Reuse of effluents from the WWTS and its relationship with the Sustainable Development Goals

The reuse of effluents from STARs for irrigation and cleaning of municipal areas is compatible with SDG 20-30 presented by the UN described in **figure 5.**

Figure 5. Sustainable development goals
Source: PNUD

7.5 Reuse of effluents from the WWTS and its relationship with the National Water Security Plan 2015-2050

The reuse of effluents from WWTS for irrigation areas is consistent with the goals described in **figure 6** of the National Water Security Plan 2015-2050 of Panama.

Figure 6. Objectives of the water security plan 2015-2050
Source: Water Security Plan 2015-2050

CONCLUSIONS

The reuse of effluents from the WWTS would represent a positive impact for the Technological University, not only in economic terms, but also in environmental and social terms by carrying out activities that encourage a circular economy.

- Despite being an excellent project in terms of sustainability, it could present certain challenges such as: rejection by the student and administrative population, non-compliance with water quality, difficulty in creating an implementation system and of laws that govern the same and the conditions of the soil;
- It is recommended that more scientific studies be carried out on the subject to develop opportunities for the reuse of WWTS effluents, not only for the irrigation of green areas, but also for various activities within the campus with the aim of reducing the amount of drinking water that is currently uses;
- For future research on the subject, it is recommended to carry out studies on the behavior of plants and their sensitivity to the concentrations of the different nutrients found in the water, as well as a study for the optimization of the current wastewater treatment system.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their gratitude first to God, for giving them the wisdom and patience to finish this article, to Dr. Euclides Deago for his support and guidance during the execution of this article, to the research project FIED19-R2-018 for helping us in the characterization of the effluent, to SENACYT for funds allocated to this research, to the Department of Green Areas, UTP for all the information.

REFERENCES

[1] Organización para las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO),

"Abordar la Escasez y la Calidad del Agua," [Online]. Available: https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad#:~:text=Cerca%20de%20una%20quinta%20parte,para%20tomar%20agua%20de%20los.

[2] World Water Council, "Water Problems en Latin America," 22 Marzo 2004. [Online]. Available: https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/News/WWC_News/water_problems_22.03.04.pdf.

[3] Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica 2016, "Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos.," 8 Noviembre 2016. [Online]. Available: https://www.pa.undp.org/content/panama/es/home/library/environment_energy/plna_seguridad_hidrica_agua_para_todos.html.

[4] S. Toze, "Reuse of effluent water—benefits and risks," *Agricultural Water Managment,* p. 147–159, 2006.

[5] P. H. D. P. A.V. Deshmukh, "TREATMENT AND REUSE OF WASTE WATER IN COEA CAMPUS," *nternational Research Journal of Engineering and Technology,* vol. 04, no. 08, pp. 241-247, 2017.

[6] C. Gill, "Penn State University," 28 marzo 2022. [Online]. Available: https://www.psu.edu/news/agricultural-sciences/story/penn-states-living-filter-be-focus-wastewater-reuse-conference/. [Accessed 01 junio 2022].

[7] T. E. Tribune, "The Express Tribune," 13 junio 2014. [Online]. Available: https://tribune.com.pk/story/721086/collaborative-research-qau-launches-on-campus-wastewater-reuse-project. [Accessed 30 mayo 2022].

[8] Emory University, "Smarter Water," abril 2020. [Online]. Available: https://news.emory.edu/features/2020/04/waterhub/. [Accessed 06 Junio 2022].

[9] Observatorio de la Sustenibilidad en la Educación Superior de América Latina y el Caribe, "Observatorio de la Sustenibilidad en la Educación Superior de América Latina y el Caribe," [Online]. Available: https://oses-alc.net/experiencia-universi/reuso-de-aguas-residuales-tratadas-en-la-ptar-de-la-u-d-c-a/. [Accessed 11 junio 2022].

[10] L. Schleifer, "World Resource Institute," 24 August 2017. [Online]. Available: https://www.wri.org/insights/7-reasons-were-facing-global-water-crisis. [Accessed 16 septiembre 2022].

[11] L. Barrera, A. Díaz, E. López, E. Medina, M. Rivera and E. Vallester, "Evaluación del desempeño del filtro biológico de la Universidad Tecnológica de Panamá," *Revista de Iniciación Cientifica ,* vol. 4, no. 1, pp. 23-29, 2018.

[12] M. G. R. T. Tarik Chfadi, "Public Acceptance ofWastewater Reuse: New Evidence from Factor and Regression Analyses," *Water,* vol. 13, no. 1391, 2021.

[13] K. A. E. A. M. A. Peter R Nkhoma, "Recycled water reuse: what factors affect public acceptance?," *Environmental Conservation,* no. 48, pp. 278-286, 2021.

[14] T. Nuñez, "Ambiente Natural del Campus Victor Levi Sasso," *El Tecnológico,* pp. 6-8, 2010.

[15] Instituto de Estadistica y Censo de Panamá, "Instituto de Estadistica y Censo de Panamá," 2019. [Online]. Available: https://www.inec.gob.pa/archivos/P0533424202104 05133812Gr%C3%A1fica%202.pdf. [Accessed 18 Septiembre 2022].

[16] Instituto Nacional de Estadistica y Censo de Panamá, "Instituto Nacional de Estadistica y Censo de Panamá," 2020. [Online]. Available: https://www.inec.gob.pa/archivos/P0705547520210 504131442Gr%C3%A1fica%202.pdf. [Accessed 18 Septiembre 2022].

[17] Ministerio de Comercio e Industria, "Reglamento técnico DGNTI-COPANIT 24-99," Panama, 1999.

[18] D.-I. C. P.-I. M. W. D. E. v. M. Dra. Heike Hoffmann, Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment, Eschborn, 2011.

[19] J. Vymazal, "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment," *Water,* pp. 530-549, 2010.

[20] S. Ricart and A. Rico-Amorós, "Constructed Wetlands to Face Water Scarcity and Water Pollution Risks: Learning from Farmers' Perception in Alicante, Spain," *Water,* 2021.

[21] A. I. Stefanakis, "The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management," *Sustainability,* 2019.

[22] DIRECCION NACIONAL DE ELECTRICIDAD, AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO, "Autoridad Nacional de los Servicios Públicos," [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/agua/tarifas/tarifa_1_IDAAN.pdf. [Accessed 07 06 2021].

[23] C. Maquet, "Wastewater reuse: a solution with a future," *Field Actions Science Reports,* no. 22, pp. 64-69, 2020.

[24] R. G. a. G. P. P. Upendra M. Sainju, Nitrogen Fertilization I: Impact on Crop, Soil, and Environment, Sao Paulo: Intechopen, 2019.

[25] M. G. R. T. Tarik Chfadi, "Public Acceptance of Wastewater Reuse: New Evidence from Factor and Regression Analyses," *Water,* vol. 13, 2021.

[26] J. Vymazal, "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience," *Environmental Science & Technology,* p. 61–69, 2011.

[27] J. Wang, Y. Long, G. Yu, G. Wang, Z. Zhou, P. Li, Y. Zhang, K. Yang and S. Wang, "A Review on Microorganisms in Constructed Wetlands for

Typical Pollutant Removal: Species, Function, and Diversity," *Frontier in Microbiology,* 2022.

Description of the availability of hydrological and hydrogeological information on wells in the Zaratí River sub-basin

Descripción de la disponibilidad de información hidrológica e hidrogeológica de pozos en la subcuenca del Río Zaratí

Alexandra González
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría Científica en Recursos Hídricos
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
alexandra.gonzalez1@utp.ac.pa

Cristel Julissa Cedeño Martínez
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
cristel.cedeno@utp.ac.pa

José R. Fábrega-Duque
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigadores SNI
Ciudad de Panamá, Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

***Abstract*— Groundwater is an essential source of fresh water, and its sustainable use is necessary for its preservation. Within the National Water Security Plan of Panama, the Arco Seco is one of the most critical regions, given its vulnerability to climate change and intensive groundwater use. Although this region has numerous drilled wells, few of them have good hydrological and/or hydrogeological records. This situation is one of the first challenges that studies seeking to contribute to improving integrated water resource management face. This research aims to elaborate a database that consolidates existing information on wells managed by national institutions such as IDAAN, MIDA, MiAMBIENTE, and MINSA in the Zaratí river sub-basin. The review of existing data included a bibliographic search and field campaigns. As a result, 54 variables associated with the study of groundwater and 237 wells were identified. This database allowed us to make a descriptive statistical analysis of the hydrological and hydrogeological information available. It was found that MiAMBIENTE has better records in terms of water use, lithological information, well depth, and physical parameters.**

Keywords—Water Resources, groundwater

***Resumen* — El agua subterránea es una fuente esencial de agua dulce, y su uso sostenible es necesario para su conservación. Dentro del Plan Nacional de Seguridad Hídrica de Panamá, el Arco Seco es una de las regiones más críticas, dada su vulnerabilidad al cambio climático y al uso intensivo de aguas subterráneas. Aunque esta región cuenta con numerosos pozos perforados, pocos de ellos tienen buenos registros hidrológicos y/o hidrogeológicos. Esta situación es uno de los primeros desafíos que enfrentan los estudios que buscan contribuir a mejorar la gestión integrada de los recursos hídricos. Esta investigación tiene como objetivo elaborar una base de datos que consolide la información existente sobre pozos administrados por instituciones nacionales como IDAAN, MIDA, MiAMBIENTE y MINSA en la subcuenca del río Zaratí. La revisión de los datos existentes incluyó una búsqueda bibliográfica y campañas de campo. Como resultado se identificaron 54 variables asociadas al estudio de aguas subterráneas y 237 pozos. Esta base de datos nos permitió realizar un análisis estadístico descriptivo de la información hidrológica e hidrogeológica disponible. Se encontró que MiAMBIENTE tiene mejores registros en cuanto a uso de agua, información litológica, profundidad de pozo y parámetros físicos.**

Palabras claves —Recursos hídricos, aguas subterráneas

I. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son cuerpos de agua existentes bajo la superficie de la tierra. Se encuentran bajo el nivel freático, saturando los poros y fisuras de las capas de suelo. El agua fluye y alcanza la superficie a través de manantiales, cauces fluviales o directo al mar [1]. Las aguas subterráneas fluyen a través de acuíferos, los cuales son unidades geológicas permeables y saturadas que permiten transmitir cantidades significativas de agua bajo gradientes hidráulicos ordinarios [2].

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022, el 99% de la totalidad del agua dulce en estado líquido lo conforman las aguas subterráneas. Además, la mitad del agua extraída para el consumo doméstico proviene de las aguas subterráneas. Se estima que en América Latina y el Caribe menos del 30% de la extracción de agua proviene de aguas subterráneas y el monitoreo de estas es deficiente, arriesgando la sostenibilidad del uso de este recurso [3].

El desarrollo de este estudio atiende las metas del objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente la meta 6.4 que propone "aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y aseguras la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento del agua dulce…" [4]. También, se atienden las metas establecidas por el Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050 Agua para Todos (PNSH), aportando al propósito de avanzar hacia una cultura responsable del agua, a la meta N°4 de cuencas hidrográficas saludables y la meta N°5 de sostenibilidad hídrica. Entre las acciones a tomar, se tiene la necesidad de delimitar los acuíferos, identificar zonas de recarga y determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas en zonas prioritarias, entre estas, el Arco Seco.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00089

El Arco Seco es una de las regiones climáticas de Panamá, que comprende las llanuras y colinas de la costa oriental de las provincias de Los Santos y Herrera y el litoral Sur de la provincia de Coclé [5]. Esta región es conocida por presentar vulnerabilidad al cambio climático de media a alta [6]. Además, se caracteriza por hacer uso intensivo de las aguas subterráneas y presentar malas prácticas en perforación de pozos, por personas naturales, jurídicas e instituciones estatales, teniendo como consecuencia una construcción desordenada de pozos [7].

En Panamá, se realizó un estudio sobre identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa. En este trabajo se señaló la limitada gestión administrativa que permita tener un control de la explotación de acuíferos, así como su regulación y protección. En consecuencia, se exponen a los cuerpos de agua subterráneos a la sobreexplotación del recurso. También se indica que, existe una falta de conocimiento en las características como la geología, hidrogeología, hidrología, hidrodinámica, calidad, capacidad, tasa de renovación, vulnerabilidad, etc. Otro aspecto notable es que, a pesar de tener una gran cantidad de pozos georreferenciados, estos carecen de información técnica como la profundidad, el diámetro de perforación, el diseño del pozo, formaciones geológicas atravesadas, producción, entre otras [8].

Para la cuenca del río Parita, se elaboró un inventario de pozos, como uno de los objetivos del estudio, para determinar los flujos de agua subterránea a través de la cantidad y calidad. Sin embargo, la escasa información hidrológica de los pozos evidenció la vaga comprensión cuantitativa que se tiene para la cuenca [9]. Así también, se han realizado estudios en la Subcuenca del Rio Zaratí (SRZ), donde la escasez de datos ha sido un reto.

Estos estudios contienen inventario de pozos que describen la geología, geomorfología, hidrogeología, hidro geoquímica [10]. Sin embargo, a pesar de que estas investigaciones evidencian la necesidad de bases de datos más completas y la utilidad de esto para el estudio de cuencas y aguas subterráneas, las instituciones encargadas del manejo del recurso hídrico en Panamá todavía no manejan un formato homologado para el registro de datos al construir pozos.

De allí, que en este trabajo se inventarían pozos dentro y en los alrededores de la SRZ, para crear una base de datos que permita describir la disponibilidad de la información existente para conocer que hace falta y en qué medida. Se identificará la información hidrológica e hidrogeológica necesaria para la continuación de estudios de monitorización, caracterización, hidro química y modelación matemática que permita a la SRZ tener un mejor manejo integrado del recurso hídrico.

II. METODOLOGÍA

Esta investigación comprendió un enfoque mixto de alcance descriptivo elaborado en tres etapas. La primera consistió en una breve revisión de la literatura para evaluar estudios de aguas subterráneas en Panamá, especialmente en la SRZ. En la segunda etapa se realizaron giras a campo para solicitar a las instituciones encargadas de la administración de los recursos hídricos información técnica de los pozos y apoyo para visitar algunos pozos y georreferenciarlos. Luego, se elaboró un mapa con la distribución espacial de los pozos inventariados y una base de datos de éstos. Como última etapa se aplicó estadística descriptiva para un análisis cuantitativo de la base de datos. A continuación, se describe el área de estudio, la estructuración de la base de datos y su análisis:

A. Área de estudio

La subcuenca del río Zaratí (SRZ), está localizada en la cuenca hidrográfica 134 (Río Grande), provincia de Coclé, dentro del Arco Seco, como se muestra en la

Fig. 1.

Se caracteriza hidrogeológicamente, por ser un valle intermontano que da paso a una llanura aluvial, donde el basamento de los valles lo conforman formaciones volcánicas como: El Valle (TM-Yen) y Cerro El Encanto (TMPL-VA). Estos se definen como acuitardos, es decir que son capaces de almacenar agua, pero la transmiten con dificultad. Por otro lado, la llanura aluvial está constituida por la formación sedimentaria de Rio Hato (QR-Aha), la cual tiene un gran potencial para el almacenamiento y explotación de aguas subterráneas, porque la conforman materiales sedimentarios consolidados y no consolidados [11]. Una descripción de la geología existente en el SRZ se presenta en la *Fig. 2*

Fig. 1. Localización del área de estudio

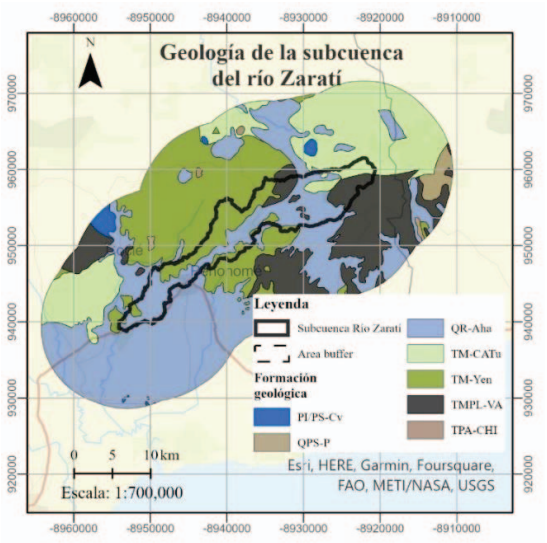


Fig. 2. Geología del área de estudio

La SRZ ha registrado un incremento en la explotación desordenada de las aguas subterráneas en vista de la escasez de fuentes superficiales, principalmente en la época seca. Sin embargo, se desconoce información básica como la cantidad de pozos y la calidad de la información técnica de éstos [12].

Dado que las fronteras de las cuencas hidrogeológicas no necesariamente coinciden con las cuencas hidrográficas, se agregó una zona "buffer" de 10 Km a la SRZ para la delimitación del área de estudio (Ver

Fig. 1).

B. Estructuración de base de datos

Para la elaboración de la base de datos de aguas subterráneas en la SRZ se recopilaron datos físicos, geológicos, químicos e isotópicos a través de la revisión bibliográfica de estudios realizados en la región de Coclé [10], [13]. Igualmente se recopiló la información existente en los organismos gubernamentales a cargo de la explotación y gestión de los recursos hídricos: el Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA), Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE), Ministerio de Salud (MINSA) y el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN).

La estructura de la base de datos se consolidó en una hoja de cálculo *Excel* con las variables que se describen en la TABLA I. , que se agrupan en datos de ubicación, datos físicos y datos químicos.

TABLA I. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN LA BASE DE DATOS

Categoría	**Descripción de variables**	
	Variable	***Unidades***
Ubicación	Código	
	Coordenadas	UTM
	Elevación sobre el nivel del mar	m
	Cuenca hidrográfica	
	Ciudad	
	Distrito	
	Corregimiento	
	Institución	MINSA MIDA IDAAN MiAMBIENTE
	Uso	
Datos físicos	Profundidad	m
	Fecha de Perforación	
	Diámetro de perforación	pulg
	Diámetro del forro	Pulg
	Intervalos de enrejillado	M
	Nivel estático	M
	Nivel dinámico	M
	Caudal	m^3/h
	Transmisibilidad	m^2/s
	Almacenamiento	$s^{1/2}$
	Conductividad hidráulica	m/d
	Tipo de pozo	Producción, Observación, en uso, abandonado
	Tipo de extracción	Manual, Bomba
	Formación	
	Tipo de roca	
	Litología	
Datos químicos	Fecha de muestreo	
	Temperatura	C°
	Conductividad eléctrica	µS/cm
	pH	
	O-18 (‰)	(‰)
	H-2 (Deuterio) (‰)	(‰)
	H-3 (U.T.) unidades	UT

Categoría	Descripción de variables	
	Variable	*Unidades*
	Cl, NO3, SO4, HCO3, Ca, Mg, Na, K, Cl, Zn, Ba, Si, Sr,S, TDS, As, B, Cd, Hg, Pb, Cu, Fe	mg/L

C. *Análisis de datos*

Se realizó un análisis espacial y descriptivo de la base de datos a través de mapas, graficas de barra y diagramas de caja. Adicionalmente, con la versión educativa del software *ArcgisPro versión 2.8.7*, se generó un mapa para visualizar la distribución espacial de los pozos agrupados por institución. En este mapa se describen las variables que corresponden a la categoría de ubicación.

Las gráficas de barra y diagramas de caja se elaboraron usando Excel, para mostrar la cantidad de pozos por institución, uso, profundidades, estado del registro y disponibilidad de la información física y química.

III. Resultados y Discusión

El estado de la información referente a las aguas subterráneas en Panamá se encuentra de manera desordenada, dispersa y con vaga información hidrológica e hidrogeológica, lo que se convierte en el primer obstáculo para el estudio, monitoreo y conservación de este recurso. Esto se debe entre otras cosas, a la falta de homogeneidad en los formatos de registro de pozos, entre las diversas instituciones con competencia para el uso de las aguas subterráneas.

Por una parte, el IDAAN suple de agua subterránea a poblaciones mayores de 1500 habitantes que no cuentan con la facilidad de obtener agua superficial; el MINSA, con el departamento de perforaciones de pozos, vela por abastecer de agua potable a comunidades rurales menores de 1500 habitantes; MiAMBIENTE es facultado por la ley para reglamentar el uso de las aguas subterráneas. Por último, el MIDA con el departamento de ingeniería, se encarga de perforar pozos con fines agrícolas y agropecuario. Sin embargo, para lograr una gestión sostenible de las aguas subterráneas es importante que las instituciones empiecen a evaluar la misma información.

La base de datos de pozos realizado en la SRZ atiende a una de las medidas importantes para la conservación de las aguas subterráneas, comentadas en el documento “Las aguas subterráneas de la región del arco seco y la importancia de su conservación” [14]. Para su estructura se tomó en cuenta la siguiente información mínima: localización (sitio, coordenadas, elevación, propietario, fecha de construcción, encargado y equipo de la perforación), diseño del pozo, documentación litológica realizada por un profesional, prueba de bombeo con la medición del caudal permanente y el movimiento del nivel del agua (por lo menos, la recuperación), análisis fisicoquímico y bacteriológico del agua, con recomendaciones respecto a su calidad.

La distribución espacial de los pozos (

Fig. 3), muestra una mayor concentración de pozos en la parte baja y media de la cuenca, que es donde se presenta mayor densidad de población y se desarrollan más actividades económicas. Por otro lado, la menor densidad de pozos, en la parte alta de la cuenca se debe a que las pequeñas comunidades que residen en esta zona son abastecidas directamente por acueductos rurales.

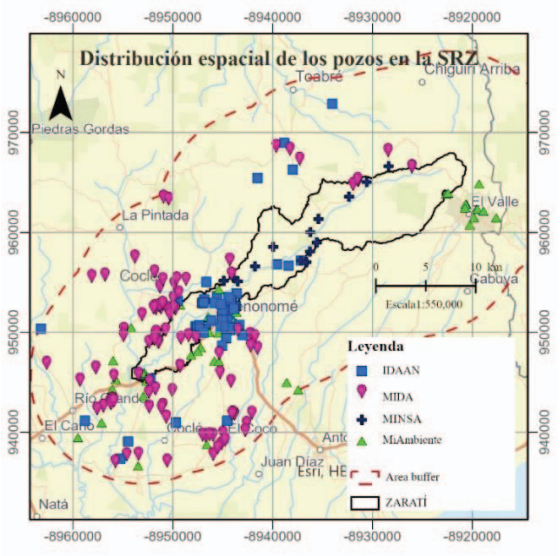


Fig. 3 Distribución espacial de los pozos en la SRZ

Se obtuvieron 237 pozos inventariados para la SRZ, de los cuales 113 pertenecen al MIDA, El IDAAN cuenta con 63 pozos, el MINSA con 14. Por otro lado, MIAMBIENTE cuenta con 47 pozos. Adicionalmente, se encontraron 48 pozos dentro de estudios desarrollados en el área de Zaratí ([10], [13], [15]); sin embargo, no se especificaba con claridad a que institución pertenecían, por lo que no fueron usados para este análisis.

A continuación, se describe el registro de algunas de las variables de los pozos por institución.

A. *Uso de los pozos*

Se contabilizaron 16 categorías, según los usos del agua presentadas en la *Fig. 4*. Del total de los pozos, se obtuvo un 35.86% sin registro, 20.68% para uso pecuario, 10.55% para uso agrícola y 8.86% para abastecimiento a la comunidad, 6.75% domestico, y 5.91% domestico comercial, los usos restantes están por debajo del 5%.

Atendiendo a la categoría de usos por institución, en los registros del MINSA se validó en campo, que estos pozos corresponden a las Juntas de Acueducto y Alcantarillado Rural (JAAR) para el abastecimiento de comunidades, correspondiendo a un 5.91% de este uso. Del MIDA se encontró un 20.68% para uso pecuario, 13.92% sin registro, 9.70% uso agrícola, 2.23% uso agropecuario y un 0.42% para comunitario. Para MiAMBIENTE se encontró que un 6.75% corresponde a uso doméstico, 5.91% doméstico comercial y 2.53% industrial; los usos agrícolas, domestico industrial, recreativo y turístico y domestico agropecuario cuentan con un 0.84%

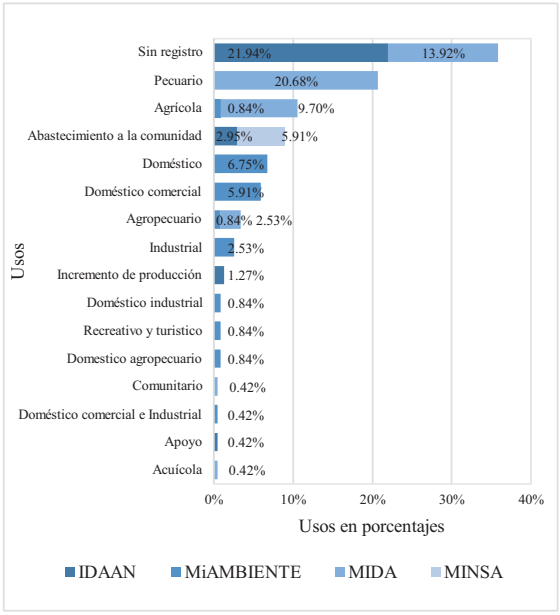


Fig. 4 Distribución porcentual de pozos según el uso del agua e instituciones en la SRZ.

El IDAAN ocupa el 21.94% de pozos sin registros, un 2.95% de pozos para abastecimiento a la comunidad, el 1.27% de incremento de producción y 0.42% de apoyo. Estos últimos, se deben a que la planta potabilizadora Efraín Meneses en Penonomé no puede suplir la demanda por el crecimiento acelerado de la población. Un estudio del año 2010 [16] puso en evidencia, que el diseño de la planta podía suplir a la población hasta el año 2020, sin embargo, un estudio más reciente [17] mostró que la población actual es de 35,995 habitantes, superando la población proyectada para el año 2030. También evidencia que la red de distribución es de tipo ramificada abierta, donde el agua circula por la red en un único sentido y se amplía, según se añaden nuevos usuarios, haciéndola cada vez más compleja e ineficiente hidráulicamente en algunos sectores. Además, el IDAAN dentro de su informe [18], resalta rehabilitar 15 pozos para garantizar el agua en ciertos sectores cuando la planta esté fuera de operaciones por mantenimientos o lluvias.

B. *Información litológica*

En cuanto a registros de información litológica, se encontró que el 100% de los pozos inventariados del MINSA y MIDA no presentan información litológica. Esto evidencia que estos pozos, no son perforados con el objetivo de ser sometidos al trámite de concesión, de lo contrario, estos contarían con los requisitos mínimos que exige el MiAMBIENTE. Para el MiAMBIENTE y el IDAAN se obtuvo información litológica del 44.68% y 50.79% de sus pozos, respectivamente. Sin embargo, estas cifras siguen siendo bajas, puesto que la ley exige registros litológicos. Estos datos se presentan en la *Fig. 5*

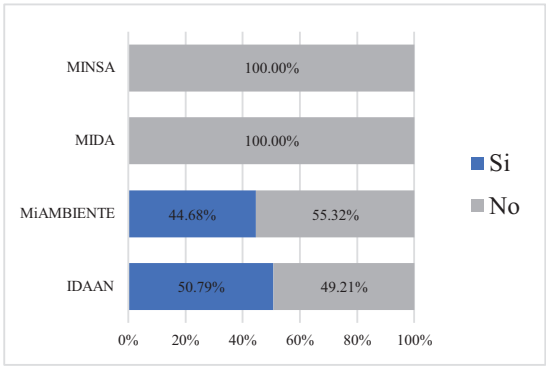


Fig. 5 Registro de información litológica registrada por institución

C. *Profundidad de perforación*

Para este parámetro, se clasificaron los pozos en rangos de 0 a 30 m (poco profundo) y de 30 a 100 m (profundo). En la *Fig. 6* se presenta el porcentaje de los pozos por institución con dicha información.

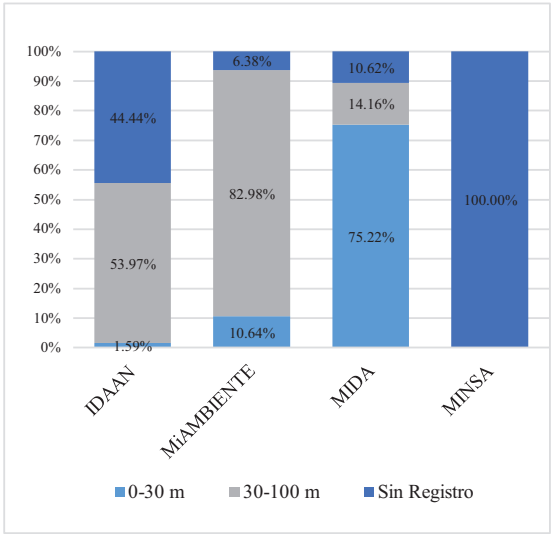


Fig. 6 Rango de profundidad de perforación de pozos por institución

Para el MINSA el 100% de sus pozos, carece de este registro y en las giras de campo se trató de recopilar esta información con las JAARs, pero estas se mostraban muy dudosas para dar la cifra correcta, además los cambios de junta directiva y en algunos casos la pérdida de la información, imposibilito la busqueda por esta via. De los expedientes consultados del IDAAN, el 44.44% se encontraban sin este registro, pero la institución tiende a perforar pozos profundos, en un 53.97%. En lo que respecta a MiAMBIENTE, un 10.64% son pozos poco profundos, el 82.98% corresponde a pozos profundos, y un 6.38% de sus pozos carece esta información, ya que son los expedientes más antiguos. Para el MIDA, el 75.22% de sus pozos son poco profundos, un 14.16% profundos y un 10.62% no tienen registro

La *Fig. 7* muestra que la mediana de las profundidades de los pozos para MiAMBIENTE, IDAAN y MIDA son 48.77 m, 45.72 m y 24.38 m, respectivamente. El 50% de los pozos de MiAMBIENTE oscilan entre 36.57 a 62.80 metros de profundidad, el 50% de los pozos del IDAAN tiene

profundidades de 41.15 m a 53.34 m, mientras que los del MIDA tienen profundidades de 21.33 m a 28.80 m.

Los pozos de MiAMBIENTE e IDAAN tienden a ser profundos porque buscan asegurar el abastecimiento por un tiempo prolongado, mientras que los del MIDA son de contingencia para atender las necesidades de los productores de manera puntual y temporal, esto explica su gran distribución espacial.

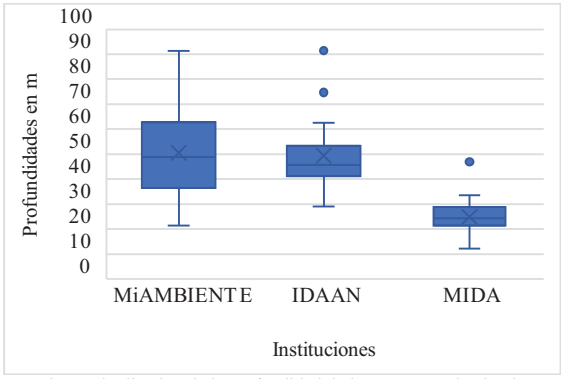


Fig. 7 Distribución de la profundidad de los pozos por institución

D. Variables físicas asociadas a las pruebas de bombeo

De los parámetros físicos, el nivel estático, nivel dinámico, caudal de equilibrio, transmisibilidad, capacidad específica, caudal específico, almacenamiento y conductividad hidráulica forman parte de los datos de interés durante las pruebas de bombeo. Del registro de 237 pozos, se cuantificó el registro de estas nueve variables. Sin embargo, en una revisión preliminar de los datos, Fig. 8, se observó que solo existen registros para ocho de estas. En esta misma gráfica se observa que existe un alto porcentaje de escasez de registro de datos para cada variable. El nivel estático posee mayor registro con un 27%, seguidamente está el nivel dinámico con 25.32%, el caudal de equilibrio con 16.46%, la transmisibilidad con 6.75%, el almacenamiento con 6.33%, la capacidad específica con 4.22%, el caudal específico con 2.53% y la conductividad hidráulica con 2.11%.

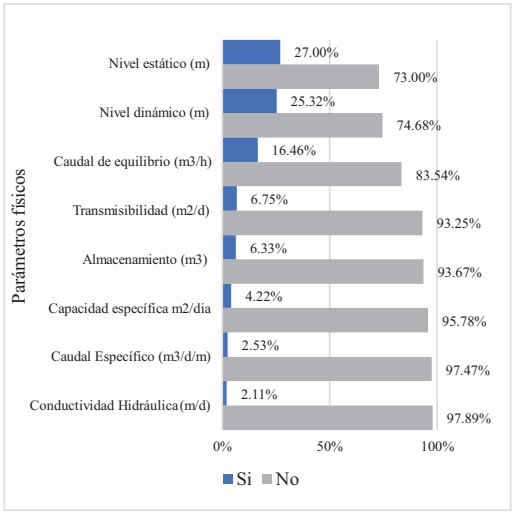


Fig. 8 Porcentaje de registro de las variables físicas asociadas a la prueba de bombeo

En la *Fig. 9* y la *Fig. 10* se presenta el porcentaje de registro encontrado por variable para MiAMBIENTE y el IDAAN, respectivamente. Por otra parte, se observó que el registro de pozos del MIDA y MINSA no contaba con datos para ningún parámetro.

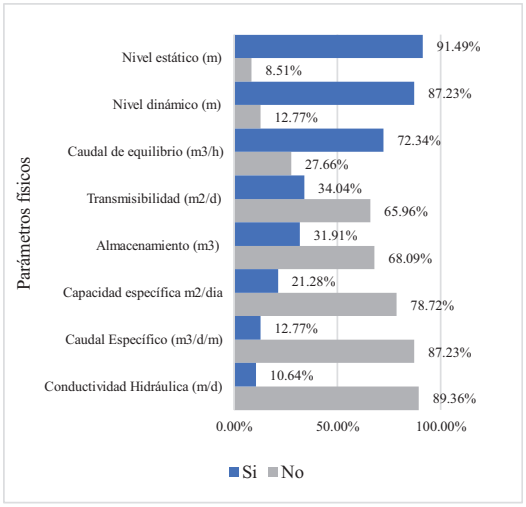


Fig. 9 Porcentaje de registros encontrados por variables físicas asociadas a las pruebas de bombeo en MiAMBIENTE

Por parte de MiAMBIENTE se encontró que, de sus 47 pozos, el nivel estático tiene el mayor registro, con 91.498%, seguidamente del nivel dinámico con 87.23%, el caudal de equilibrio con 72.34%, la transmisividad con 34.04%, el almacenamiento con 31.91%, la capacidad específica con 21.28%, el caudal específico con 12.77% y la conductividad hidráulica con 10.64%.

Para el IDAAN, de los 63 pozos, se encontró registro para el nivel estático en un 33.33%, seguidamente el nivel dinámico con 30.16% y el caudal de equilibrio con 7.94%. De las demás variables no se presentaron registros

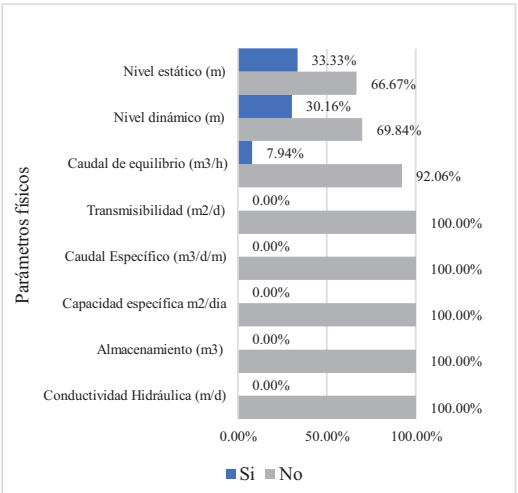


Fig. 10 Porcentaje de registros encontrados por variables físicas asociadas a las pruebas de bombeo en IDAAN

E. *Variables químicas*

Las variables químicas buscadas son, la temperatura, la conductividad eléctrica, el pH, el O-18 (‰), el H-2 (Deuterio) (‰), el H-3 (U.T.), Cl, NO3, SO4, HCO3, Ca, Mg, Na, K, Cl, Zn, Ba, Si, Sr, S, TDS, As, B, Cd, Hg, Pb, Cu y Fe se encontraron escasos registros en los 237 pozos.

IV. Conclusiones

De los registros encontrados, se identificaron 54 parámetros (TABLA I.) de utilidad para el estudio de las fuentes de agua subterráneas. Dentro del área de estudio, se identificaron 237 pozos de cuatro instituciones, entre estas el MIDA, IDAAN, MiAMBIENTE y MINSA, donde la mayor densidad de pozos se da en la parte baja y media de la cuenca.

Más de un tercio de los pozos no cuenta con registro del uso, representados por un 21.94% del IDAAN y 13.92% por el MIDA. Las cinco principales categorías de usos del agua que se desarrollan en la SRZ son: pecuarios (20.68%), agrícola (10.54%), abastecimiento a la comunidad (8.86%), doméstico (6.75%) y doméstico comercial (5.91%).

MiAMBIENTE, al ser el ente que regula las concesiones de aguas subterráneas, registra pozos en diversas categorías. Los de mayor porcentaje son domésticos (6.75%) y doméstico comercial (5.91%); sin embargo, los usos del agua que más se desarrollan en la SRZ (pecuarios y agrícola) corresponden a menos de 1% los pozos que han sido legalmente concesionados.

Sobre la información litológica, solo se encontró registro en MiAMBIENTE y el IDAAN. MiAMBIENTE posee información litológica en un 44.68% de sus pozos, mientras que el IDAAN presenta 50.79%. Por parte del MINSA y MIDA no se encontró dicha información para sus pozos.

Con respecto a la profundidad de perforación de los pozos, por institución, se observó que el MiAMBIENTE posee mayor registro de este dato, seguido del MIDA y el IDAAN. El MINSA no presentó registro de profundidades. En MiAMBIENTE e IDAAN, el 82.98% y 53.97% de sus pozos son profundos, con una media de 48.77 m y 45.72 m, respectivamente. Para el MIDA el 75.22% son poco profundos con una media de 24.38 m.

De los parámetros físicos, el nivel estático, nivel dinámico, caudal de equilibrio son las más registradas. Mientras que existe grandes escases de datos para las variables que describen las características hidráulicas de los acuíferos como: transmisibilidad, capacidad específica, caudal específico, almacenamiento y conductividad hidráulica. Por institución se observó que solo MiAMBIENTE y el IDAAN mantienen registro de estas variables. MiAMBIENTE tiene un registro casi completo del nivel estático (91.49%), nivel dinámico (87.23%) y caudal de equilibrio (72.34%). El resto de las variables poseen menos del 50% de información registrada.

El IDAAN, por su parte, solo tiene registro en tres variables: nivel estático, nivel dinámico y caudal de equilibrio, por debajo del 50% de registros disponibles. En lo que concierne a los parámetros químicos se encontraron escasos registros. Por lo que se concluye que MiAMBIENTE es la institución con mejores registros en estas variables.

Dicho lo anterior, se concluye que el estado general de la información de aguas subterráneas para SRZ, presenta muchos vacíos en la mayoría de sus variables. La mayor parte de los pozos inventariados no se encuentran concesionados, por lo que se recomienda que las instituciones desarrollen un mismo formato para el registro de los pozos que manejen las mismas unidades, tomando en cuenta las variables con porcentajes bajos en registros. De esta forma se podrían desarrollar investigaciones y balances hídricos de aguas subterráneas en la región.

Agradecimientos

Agradecemos SENACYT por hacer posible el desarrollo de esta investigación a través del financiamiento del Proyecto FID17-084, al CIHH por el apoyo logístico, a MiAMBIENTE, IDAAN, MIDA y MINSA por facilitarnos los registro e información técnica de sus pozos y por el acompañamiento a las giras de campo. Igualmente, al Sistema Nacional de Investigación (SNI) por el apoyo a uno de los autores.

Referencias

[1] J. A. López-Geta, J. M. Fornés Azcoiti, G. Ramos Gonzáles, and F. Villarroua Gil, *Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo*. Instituto Geológico y Minero de España, 2009.

[2] R. Allan Freeze and J. A. Cherry, "GROUNDWATER," 1979.

[3] UN WATER, "PROGRESS ON INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT," 2018. [Online]. Available: www.sdg6monitoring.org.

[4] Cepal, "La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe," 2018. [Online]. Available: www.cepal.org/es/suscripciones.

[5] Autoridad Nacional del Ambiente, *ATLAS DE LAS TIERRAS SECAS Y DEGRADADAS DE PANAMÁ*. 2009.

[6] A. Calderón, N. Francisco, and R. López, "ÍNDICE DE VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA REPÚBLICA DE PANAMÁ," 2021.

[7] Autoridad Nacional del Ambiente, "LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN DEL ARCO SECO," 2011.

[8] V. Opolenko de Arjona, "Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, República de Panamá," *Revista Geográfica de América Central*, vol. 2, no. 67, pp. 109–146, Mar. 2020, doi: 10.15359/rgac.67-2.4.

[9] B. Atencio Amores, "Assessing the groundwater flow pattern in terms of quantity and quality in the complex hydrological Parita Basin, Republic of Panama," 2019.

[10] P. Salinas Serrano, "MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO ZARATÍ," 2010.

[11] M. G. Castrellón, M. Muñoz, G. Guerra-Chanis, J. A. Leiva, L. Foglia, and J. Fábrega, "Las aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá: Un tesoro por explorar," *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, pp. 113–119, Jun. 2021, doi: 10.33412/apanac.2021.3180.

[12] E. Sánchez and M. Lorenzo, "Modelo hidrogeológico conceptual de la subcuenca del río Zaratí," 2021.

[13] ARCAL, ""Utilización de isótopos ambientales e instrumentos hidrogeoquímicos convencionales para evaluar los efectos de la contaminación causada por las actividades agrícolas y domésticas en la calidad de las aguas subterráneas"," 2017.

[14] Autoridad Nacional del Ambiente, *Las aguas subterráneas de LA REGIÓN DEL ARCO SECO LA REGIÓN DEL ARCO SECO y la importancia de su conservación*, 1st ed. 2013

[15] A. Souifer, "'Delimitación de Acuíferos y establecimiento de zonas derecarga, para identificar su vulnerabilidad y el desarrollo de una estrategia para su protección y conservaciónen el Arco Seco del país,'" 2010.

[16] W. del C. González Carrasco, "Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá," 2011.

[17] M. I. Ashaw Muñoz, D. Navarro, and E. Gil Sánchez, "MODELACIÓN MATEMÁTICA APLICADA A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL DISTRITO DE PENONOMÉ, REPÚBLICA DE PANAMÁ," *Tecnociencia (Panama)*, vol. 22, no. 2, pp. 45–67, 2020.

[18] Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales, “Logros IDAAN. RESUMEN 2019-2020,” 2020.

Using concept maps as a tool to understand water resources management in the Rio Grande basin

Uso de mapas conceptuales como herramienta para comprender el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del Río Grande

Alexandra González
Facultad de Ingenieria Civil, MSc.Recursos Hídricos
Universidad Tecnologica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
alexandra.gonzalez1@utp.ac.pa

Víctor Gómez
Facultad de Ingenieria Civil, MSc.Recursos Hídricos
Universidad Tecnologica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
victor.gomez3@utp.ac.pa

José R. Fábrega-Duque
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigadores
Ciudad de Panamá, Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

Gisselle Guerra-Chanis
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigadores
Ciudad de Panamá, Panamá
gisselle.guerra@utp.ac.pa

Carlos Saito
Department of Ecology/Institute of Biological Sciences and Center for Sustainable Development
University of Brasilia
Global Water Partnership-South America
Brasilia, Brasil
saito@unb.br

***Abstract*— Integrated Water Resources Management (IWRM) requires the interdisciplinary intervention, and the representativity and participation from all stakeholders in the watershed. This study proposes the application of concept maps methodology as a tool to improve comprehension of the Rio Grande watershed management. IWRM is a known concept in Panama, however, there is no background in the application of concept maps to design Watershed Management Plans. First, we selected the Río Grande Watershed because its representativity in the country. It has a total surface area of 2.384,2 km2, where water is used for agriculture, commerce, industries, human consumption, hydropower, and other uses. Then we designed and applied a problem and solution matrix, according to the IWRM toolbox from the Global Water Partnership (GWP). Based on the matrix, concept maps were designed for each IWRM aspect taken into consideration. Concept maps achieved to illustrate, in a simpler way, the interconnectivity and relation among each element that integrates each IWRM aspect. In this way, comprehension is improved and hence the application of measurements to achieve the design and implementation of efficient Watershed Management Plans.**

Keywords— Integrated watershed management, water resources, concept maps, management plan, Global Water Partnership.

***Resumen* — La gestión integrada de cuencas hidrográficas (GIRH) requiere de la intervención interdisciplinaria, así como de la participación y representatividad de todos los actores de la cuenca. Este estudio plantea la aplicación de la metodología de mapas conceptuales como una herramienta que permita comprender el manejo de la cuenca del Río Grande. La GIRH es un concepto usado en Panamá, sin embargo, no hay antecedentes de la aplicación de mapas conceptuales para el diseño de Planes de Manejo de Cuenca. Primero, seleccionamos la cuenca del Río Grande por su representatividad a nivel nacional. La misma tiene una superficie total de 2,384.2 km² donde se aprovecha el recurso hídrico para usos agropecuarios, industriales, comerciales, consumo humano, hidro-energético, entre otros. Lo siguiente fue diseñar y aplicar una matriz de problemas y soluciones, de acuerdo con la caja de herramientas del Global Water Partnership (GWP), aplicado a la GIRH. Con base en esta matriz, elaboramos mapas conceptuales para cada aspecto de la GIRH contemplado. Los mapas conceptuales lograron ilustrar, de forma más simple, la interconectividad y relación entre los elementos que integran cada aspecto de la GIRH. De esta forma, se puede mejorar la comprensión y por ende la aplicación de medidas para lograr el diseño e implementación de Planes de Manejo eficientes.**

I. INTRODUCCIÓN

El uso de mapas conceptuales para describir los componentes de un sistema ambiental aumenta la coherencia y comprensión de todos los elementos que conforman el sistema [1]. La estructura de un mapa conceptual permite ver la conectividad entre los elementos que influyen en el manejo de una determinada cuenca. Adicionalmente, esta metodología permite integrar la opinión de expertos de diversas disciplinas y ofrece un punto de partida para la discusión de soluciones, causas, efectos, etc. [2]. A pesar de que la metodología de mapas conceptuales son el resultado de investigaciones sobre el aprendizaje y conocimiento humano; su aplicación se ha extendido a múltiples disciplinas [3]. Siendo sus inicios los años 70s y 80s, la aplicación de este método ha evolucionado con el tiempo. Su aplicación en distintas ciencias como la biología, sociología, y geografía entra otras, demuestran su versatilidad y amplio campo de implementación. Sin embargo, este abordaje no tiene antecedentes en el manejo y planificación de los recursos hídricos en la República de Panamá.

Según el Plan Nacional de Seguridad Hídrica (PNSH) 2015-2050, Panamá cuenta con 52 cuencas hidrográficas y tiene una disponibilidad hídrica de 119.5 mil millones de m^3, de los cuáles solo aprovecha el 25% [4]. De estas 52 cuencas hidrográficas solo cinco cuentan con Planes de Manejo de Cuencas oficialmente aprobados. Esto evidencia los retos

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00090

planteados en el PNSH, donde se considera como Reto #3: "Restaurar y mantener saludables las 52 cuencas hidrográficas del país" [4]. Aunado a la carencia de Planes de Manejo de Cuencas, la dinámica de los sistemas naturales y antropogénicos hace necesario un abordaje integral y efectivo para identificar los problemas y las posibles soluciones dentro de las cuencas hidrográficas de Panamá. Datos recientes indican que la demanda de agua en Panamá tiene una tendencia creciente, teniendo como consecuencia una decreciente disponibilidad de agua por habitante en los últimos 20 años [5].

Este trabajo se enfoca en la cuenca del río Grande como su área de estudio. La cuenca del Río Grande es una de las Cuencas prioritarias dentro de la República de Panamá. Actualmente no existe un Plan de Manejo para la cuenca del Río Grande, por eso se realizó una evaluación de las condiciones actuales (problemas) de la misma. Finalmente surgieron soluciones ante la problemática presentada, que fueron organizadas con su correspondiente problema en una matriz de interacción, según diferentes temáticas representativas de las áreas de conocimiento e interés de la GIRH. A través del modelo de mapa conceptual los resultados de la matriz son presentados e ilustrados. Se espera que el empleo de conceptos clave, vinculados entre sí, permitirá un mejor entendimiento y será una herramienta clave para los tomadores de decisiones y administradores del recurso hídrico en Panamá [2]. Este trabajo se desarrolla como una primera aproximación en la elaboración de un mapa conceptual que integre problemas y soluciones para la infraestructura técnica en la cuenca del río Grande.

II. Metodología

Esta investigación cuenta con un enfoque cualitativo de alcance descriptivo, que consistió primeramente en la revisión literaria de problemas relacionados la infraestructura técnica en la cuenca de río Grande. Posteriormente, se analizó su relación con las otras disciplinas de la GIRH, mediante una matriz, por último, se elaboró un mapa conceptual general de manera lógica e interrelacionada en mapas conceptuales más puntuales, para luego vincularlos con posibles soluciones integrales. A continuación, se describe el área de estudio, estructura del mapa conceptual, matriz de problemas y soluciones y la herramienta para el desarrollo de este.

A. Área de estudio: cuenca de río Grande

La cuenca hidrográfica del río Grande está ubicada en la vertiente del Pacífico de la Región Central de Panamá y forma parte del Arco Seco. Tiene una superficie total de 2,384.2 km^2, por lo que se considera un cuenca intermedia-grande [6]. Su cauce principal es el río Grande, que nace a 1542 metros sobre el nivel del mar (msnm) y tiene una longitud de 97.2 km. La cuenca está representada principalmente por regiones bajas y llanuras costeras con elevaciones entre 0 a 100 msnm; sierras y colinas con elevaciones de 200 a 800 msnm y regiones montañosas con elevaciones de 1,200 a 2,200 msnm. El clima, según el sistema de clasificación de McKay, se caracteriza por un Clima Tropical con una Estación Seca Prolongada. En cuanto a la capacidad de uso de suelo según el Sistema de Clasificación USDA, la cuenca del río Grande tiene 72% de tierra no cultivable y 28% con capacidad agrológica cultivable (ver Fig. 1) [7].

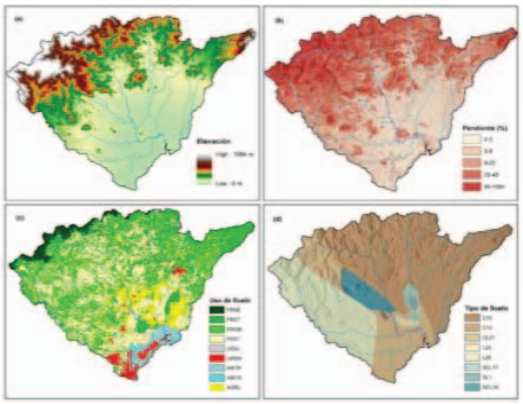


Fig. 1. Descripción general de la cuenca de río Grande: a) elevación, b) pendiente, c) uso de suelo, d) tipo de suelo. [7]

Administrativamente, el 97% de la cuenca se encuentra dentro de la provincia de Coclé y el 3% pertenece a la provincia de Veraguas. La población total, según el último censo de 2010, es de 130,392 habitantes. Dentro de la cuenca se desarrollan actividades económicas relacionadas con el sector primario, tales como: cultivos de arroz, caña de azúcar, cítricos, proyectos de reforestación, siembra de pastos, pastos y camarón; sin embargo, en localidades con mayor densidad poblacional como Penonomé, la capital de la provincia, se desarrollan actividades del sector público, la banca, la industria y el sector hotelero.

B. Pensamiento sistémico con mapas conceptuales

Este estudio utiliza como base el Pensamiento Sistémico para definir los problemas presentes en la cuenca de río Grande.

El Pensamiento Sistémico se define [8] como el conjunto de habilidades analíticas (ver figura Fig. 2) que trabajan simultáneamente dentro de un sistema, para identificar y comprender procesos, predecir sus comportamientos e idear modificaciones para producir los efectos deseados. En otras palabras, es un pensamiento que estudia los sistemas de manera holística involucrando elementos espaciales y temporales [9].

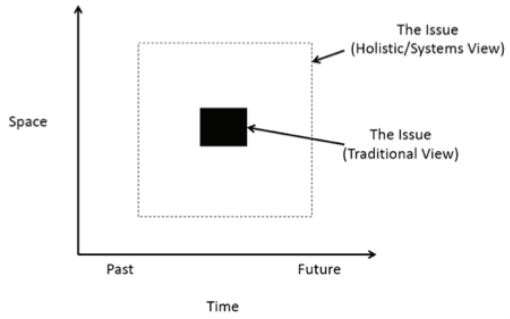


Fig. 2 Pensamiento sistémico versus puntos de vista tradicionales [9]

Una de las formas de representar el Pensamiento Sistémico es con el uso mapas conceptuales, que son modelos estructurados y bien organizados que permiten demostrar las relaciones estáticas y dinámicas de los procesos analizados. Su ventaja es que no requiere un alto grado de esfuerzo

computacional, para entender procesos complejos de la naturaleza o de otras disciplinas [10].

Actualmente, ha permanecido al margen educativo, pero se ha probado su potencial para ser utilizado en la solución de problemas, ya que permite ampliar las fronteras de los sistemas y revelar dimensiones ocultas de este [8,11, 12].

La GIRH es un proceso amplio, multidisciplinario con diversos actores cuya eficiencia puede medirse a través de indicadores sociales, económicos, ambientales, institucionales entre otros [13]. La aplicabilidad de los mapas conceptuales en la GIRH recae en sobre cuatro características de estos: desarrollo de pensamiento a gran escala, teorías de conocimiento agrupado, visualización compartida, y reducción de la carga cognitiva [14]. Para medir la eficiencia del mapa conceptual en la GIRH debemos monitorear el proceso a través de la aplicación de indicadores y metas. Estos indicadores deben ser representativos y medibles del proceso de GIRH.

C. Matriz de problemas y soluciones

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso de desarrollo y manejo de los recursos hídricos que promueve el bienestar tanto económico como social sin comprometer la sostenibilidad del recurso. La matriz de problemas y soluciones se basa en los principios de la "caja de herramientas" GIRH de Global Water Partnership (GWP). Esta caja de herramientas tiene como objetivo proveer diferentes técnicas e instrumentos, los cuáles se adaptan de acuerdo con las necesidades y particularidades de cada caso, para lograr una GIRH [15].

Para este caso de estudio, se realizó un diagnóstico integral de los problemas relacionados a la infraestructura técnica con las disciplinas de la GIRH, a través de la construcción de una matriz utilizando el software Microsoft Excel.

D. Estructura del mapa conceptual

El mapa conceptual se basó en una de las seis disciplinas de la GIRH: (1) Ambiente natural y clima, (2) leyes y políticas del agua, (3) aspectos sociales, (4) planeamiento y toma de decisiones, (5) economía, (6) infraestructura técnica. Esta última, es la que se analiza en este estudio [16]. La infraestructura técnica se define como, cualquier mecanismo utilizado para la extracción, conducción, aprovechamiento, o depuración de las aguas con un determinado fin.

Las bases para delimitar los problemas más relevantes en la cuenca de río Grande relacionados a la infraestructura técnica, se enfocaron en las siguientes categorías: suministro y tratamiento de aguas residuales, embalses, represas, sistemas de riego, pozos, alivio de inundaciones o masas de aguas artificiales para la recreación o paisajismo [16]. Además, se buscó el vínculo de estos problemas con aspectos económicos, ambientales y su efecto sobre las comunidades locales.

E. Herramienta Lucidchart

Para construir el mapa conceptual, se utilizó el software *LucidChart* que es una herramienta de diagramación basada en la web. Se accedió a la misma a través de una cuenta educativa gratuita.

III. Resultados y discusión

A. Matriz de problemas y soluciones

La matriz que relaciona los problemas y soluciones de la infraestructura técnica con las disciplinas de la GIRH es presentada en las Tabla 1 y Tabla 2.

Como resultado, tenemos que existe una falta de información acerca de la cantidad de agua disponible en la cuenca. No existen estructuras estructuras hidráulicas básicas para la recopilación y monitoreo de datos (i.e. caudal, nivel del agua, etc) Esta carencia de información compromete la sostenibilidad del recurso. En la cuenca del Río Grande tenemos precipitaciones menores de 1,500 mm/año y una alta variabilidad climática (Fig. 3).

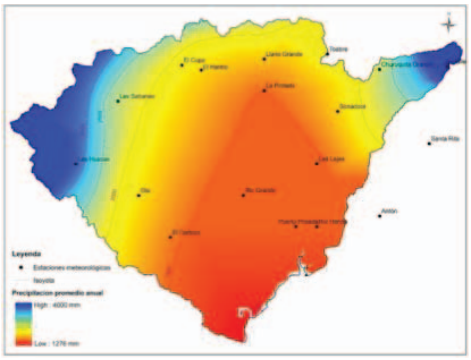


Fig. 3. Precipitación promedio anual para la cuenca de río Grande

Actualmente no existe un marco legal que normalice la operación y mantenimiento de las diferentes infraestructuras por parte de las entidades y gobiernos locales.

La infraestructura técnica impacta negativamente el aspecto social, mayormente a las comunidades más vulnerables. Según el proyecto de ley "Plan Colmena" [17], los distritos de Olá, La Pintada y Natá; y corregimientos: Chiguirí Arriba y Toabré se encuentran en pobreza extrema, lo que trae consigo una carencia de servicios de salud como agua potable y saneamiento debido a que estas comunidades se encuentran en zonas de difícil acceso y disminuyendo así la calidad de vida en las comunidades.

Una de las principales actividades económicas dentro de la cuenca de río Grande es la agricultura, la agroindustria y algunas otras pequeñas industrias. Este último grupo, al no contar con una infraestructura diseñada de acuerdo con sus necesidades, ocasiona que los pequeños y medianos productores sufran pérdidas económicas,

La planificación y toma de decisiones, carece de un plan de manejo integrado de cuencas que ayude a la elaboración de infraestructuras acorde a las condiciones naturales de la cuenca sin afectar los ejes económicos y sociales.

Tabla 1. Relación de los problemas de infraestructura técnica con las disciplinas de la GIRH

Disciplinas de GIRH	**Problemas**
	Infraestructura Técnica
Medio natural y clima	Desconocimiento de la cantidad de agua (superficial y subterránea) disponible, pone el riesgo la sostenibilidad del recurso.
Ley y Política de Aguas	Carencia de un marco legal que normalice la operación de las diferentes infraestructuras por parte de las entidades y gobiernos locales.
Aspectos sociales	No se garantiza una buena salud y calidad de vida en las comunidades más vulnerables
Economía	Las estructuras en mal estado aseguran pérdidas económicas para los pequeños y medianos productores
Planificación y Toma de Decisiones	Carencia de un plan de manejo
Infraestructura Técnica	Sistemas de riego en mal estado, perforación descontrolado y desordenado de pozos, potabilizadoras sin capacidad de abastecimiento. No existen manuales técnicos para que los productores hagan buen uso del recurso hídrico. El personal de las instituciones encargadas del agua no está capacitado para la toma y registro de datos SIG y carece de conocimientos hidrogeológicos básicos para llevar a cabo perforaciones

En la Tabla 2 se desarrollan las posibles soluciones a las problemáticas encontradas, donde la más relevante a tomar en consideración es la elaboración de un plan de manejo integrado para la cuenca que considere la participación ciudadana para su elaboración y ejecución.

Tabla 2. Relación de las soluciones de infraestructura técnica con las disciplinas de la GIRH

Disciplinas de GIRH	**Soluciones**
	Infraestructura Técnica
Medio natural y clima	Actualizar y ampliar el sistema de monitoreo de los recursos hídricos a través de la compra e instalación de estaciones. Establecer alianzas con entidades académicas para el estudio y monitoreo de las fuentes hídricas. Capacitar y comunicar a los usuarios.
Ley y Política de Aguas	Considerar la participación y representación de los integrantes de la cuenca en la conformación y promulgación de normativas y políticas relacionadas a la GIRH.
Aspectos sociales	Generar capacidades y participar con las comunidades de la cuenca.
Economía	Buscar mecanismos de financiamiento para el manejo y desarrollo de la cuenca y de sus actores claves, promoviendo el bienestar social, económico y cultural con medidas sostenibles.
Planificación y Toma de Decisiones	Elaborar un Plan de Manejo para la cuenca del Río Grande con la representación y participación de los integrantes de esta.
Infraestructura Técnica	Censo de la demanda hídrica real. Censo de infraestructura obsoleta o en mal estado. Mantenimiento y construcción de nuevas obras. Elaboración e implementación de un Plan de Manejo de Cuenca. Integración de actores claves: sociedad civil, entidades de gobierno, gobiernos locales, organizaciones no gubernamentales y la empresa privada.

B. Mapa conceptual

El mapa conceptual es definido en la Fig. 4 y abarca cinco problemas relacionados con la infraestructura para la cuenca de río Grande, que son: la red de distribución de agua potable, la planta potabilizadora Efraín Meneses, los acueductos rurales, la construcción de pozos y los sistemas de riego.

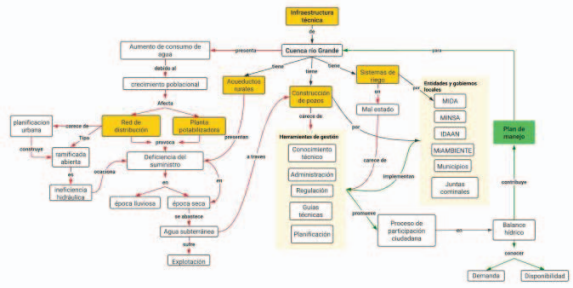


Fig. 4. Mapa conceptual de infraestructura para la cuenca de río Grande. Elaboración propia

La cuenca de río Grande presenta un aumento acelerado de la población, específicamente en la ciudad de Penonomé que está afectando directamente a la planta potabilizadora y la red de distribución. La Planta de Tratamiento de Penonomé, construida en el 2004, fue diseñada para 25,567 habitantes de comunidades urbanas y suburbanas conformadas por: El Barrero, Sonadora, Chigoré, Penonomé (cabecera) y Vista Hermosa. Según el censo del 2010, estas comunidades sumaban 16,781 habitantes. Un estudio del año 2011, indica que para el 2020 se espera que la población sea de 23,523 habitantes [18]. Esto significa que para el 2020 la Planta estuvo funcionando a su máxima capacidad. Sin embargo, en una tesis del 2020 [19], la población es de 35,995

El aumento acelerado de la población y la escaza planificación urbana, hace que la red de distribución sea de tipo ramal abierta, donde el agua circula por la red en un solo sentido y se expande a medida que se van incorporando nuevos usuarios, haciéndola cada vez más compleja e ineficiente hidráulicamente en algunos sectores. También tiene pocas instalaciones para la limpieza, lo que impide la regulación de presiones y caudales. Además, la limitación del suministro de agua potable por fallos en cualquier punto de la red. Para esto razón, las comunidades tienden a ser abastecidas por agua subterránea, mayor mente en la época seca.

Hay acueductos como Águila Abajo, Sofre Centro, Loma Grande, Cabecera del Zaratí, Subida del Coquillo y Guabal, que presentan problemas de desabastecimiento ya que la

demanda fue mayor a la ofertada y se suman las comunidades de Membrillo, Membrillo Centro, Membrillo Arriba Río Viejo Salado y Serén, según proyecciones al 2020 [18]. Esto ocurre mayormente en la estación seca, por lo que estas comunidades también se ven obligadas a abastecerse de agua subterránea.

Las razones mencionadas anteriormente, conllevan a una construcción desordenada de pozos, por parte de las comunidades y de las instituciones administradoras del recurso. El manejo de las aguas subterráneas y la construcción de sistemas de riego carece de herramientas de gestión como: conocimiento técnico, regulación, administración, de guías técnicas y de una planificación.

Una manera integral, de poder resolver estos problemas, es que las instituciones implementen herramientas gestión dentro de sus procesos y que a su vez sean vinculados con la participación ciudadana. De esta forma seria posible la creación de un balance hídrico que contribuya a la elaboración de un plan de manejo integral de cuenca para río Grande.

El uso de mapa conceptuales permite una visión compartida de las problemáticas en torno a la GIRH en la cuenca del río Grande [13]. Esta visión compartida permite a todos los actores visualizar los principales conceptos y la relación que existe entre los mismos. Podemos considerar que la efectividad de esta metodología puede medirse a través de indicadores de sostenibilidad y de GIRH en la cuenca del Río Grande. Los indicadores sirven para monitorear y medir las acciones planteadas en los mapas conceptuales.

IV. Conclusiones

Con esta investigación, se concluye que el uso de los mapas conceptuales resulta en una manera más sencilla de desarrollar las problemáticas dentro de una cuenca y ver las interacciones entre estas. Esta metodología puede integrar todos los elementos que integran una cuenca, así como los procesos llevados a cabo por estos.

Los mapas conceptuales ayudan a buscar soluciones integrales a los problemas. El uso de conceptos para ilustrar tanto elementos como procesos mejor la comprensión de los aspectos que influyen en un manejo adecuado de la cuenca, de esta forma los tomadores de decisiones pueden realizar inversiones que resulten efectivas.

Se pudo determinar que la elaboración de un plan de manejo integrado de cuencas para Río Grande es fundamental para el exitoso manejo de la cuenca. Con el mapa conceptual se pueden apreciar las medidas necesarias para solucionar problemas de infraestructura técnica, involucrando a todos los actores principales. Adicional, con esta metodología se aplican estas medidas como un diagrama de flujo. Esto quiere decir que el modelo de mapas conceptuales ayuda a entender el paso a pasos para solucionar los problemas de infraestructura en cuencas como la del Río Grande.

Agradecimientos

Agradecemos a SENACYT por hacer posible el desarrollo de este trabajo, a través del soporte al programa de Maestría Científica en Recursos Hídricos de la UTP. Igualmente, al Sistema Nacional de Investigación (SNI) por el apoyo dado a uno de sus autores.

References

[1] K. Fortuin, C. van Koppen and R. Leemans, "The Value of Conceptual Models in Coping with Complexity and Interdisciplinarity in Environmental Sciences Education", BioScience, vol. 61, no. 10, pp. 802-814, 2011. Available: 10.1525/bio.2011.61.10.10.

[2] M. Heemskerk, K. Wilson and M. Pavao-Zuckerman, "Conceptual Models as Tools for Communication Across Disciplines", Conservation Ecology, vol. 7, no. 3, 2003. Available: 10.5751/es-00554-070308.

[3] A. Cañas, G. Hill, R. Carff, N. Suri, J. Lott, G. Gómez, T. Eskridge, M. Arroyo and Rodrigo Carvajal, "CMAPTOOLS: A Knowledge Modeling and Sharing Environment", Concept Maps: Theory, Methodology, Technology, Pamplona, Spain 2004.

[4] Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica 2016, "Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para todos", Panamá, República de Panamá, Noviembre, 2016.

[5] Ministerio de Ambiente, "Oferta y uso de agua en Panamá: basados en los resultados de la Cuenta Ambiental de Agua 2000-2018", Panamá, República de Panamá, 2020.

[6] J. Guardia, "Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Grande-Panamá y propuesta de estrategia de gestion frente al cambio climático," CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), Turrialba, Costa Rica, 2017. [Online]. Available: https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11490.

[7] CATHALAC, "Estado actual de la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas de los ríos La Villa (128), Santa María (132) y Grande (134)," 2018.

[8] R. D. Arnold and J. P. Wade, "A definition of systems thinking: A systems approach," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 44, no. C, pp. 669–678, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.03.050.

[9] J. P. Monat and T. F. Gannon, "What is Systems Thinking? A Review of Selected Literature Plus Recommendations," *Am. J. Syst. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 11–26, 2015, doi: 10.5923/j.ajss.20150401.02.

[10] F. Safayeni, N. Derbentseva, and A. J. Cañnas, "A theoretical note on concepts and the need for Cyclic Concept Maps," *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 42, no. 7, pp. 741–766, 2005, doi: 10.1002/tea.20074.

[11] C. Saito, "Concept Map to Visualize Opposite Perspectives of Rapa Nui History as a Whole," *J. Hist. Archaeol. Anthropol. Sci.*, vol. 1, no. 5, pp. 182–189, 2017, doi: 10.15406/jhaas.2017.01.00029.

[12] O. B. Z. Assaraf and N. Orion, "Development of system thinking skills in the context of earth system education," *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 42, no. 5, pp. 518–560, 2005, doi: 10.1002/tea.20061.

[13] A. Pires, J. Morato, H. Peixoto, V. Botero, L. Zuluaga and A. Figueroa, "Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management", Science of The Total Environment, vol. 578, pp. 139-147, 2017. Available: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.217.

[14] Sherborne, Tony. "Mapping the curriculum: How concept maps can improve the effectiveness of course development." In Knowledge cartography, pp. 183-198. Springer, London, 2008.

[15] M. Xie, "Integrated Water Resources Management (IWRM) – Introduction to Principles and Practices 1," *Water*, pp. 1–15, 2006.

[16] Thalmeinerova, D. (ed.); Fábrega, J. R.; Guan, Y.; Janusz-Pawletta, B.; Kileshye-Onema, J. M.; Saito, C. H. (2017). IWRM Toolbox Teaching Manual. Stockholm, Global Water Partnership. Available at:http://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/iwrm_teaching_manual.pdf

[17] Ministerio de Economía y Fianzas de Panamá, "Plan estratégico 2020-2024," Dec. 31, 2019. https://www.mef.gob.pa/wp-content/uploads/2020/12/PLAN-ESTRATEGICO-DE-GOBIERNO-2020-2024-web.pdf (accessed Aug. 01, 2022).

[18] W. del C. González, "Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá.," pp. 1–175, 2011, [Online]. Available: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/293

[19] M. Ashaw, D. Navarro, and E. Sánchez, "Modelación matemática aplicada de la red de distribución de agua potable del distrito de Penonomé, República de Panamá," Tecnocienca, vol. 22, no. 2, pp. 45–67, 2020, doi: https://doi.org/10.48204/j.tecno.v22n2a3.

Experimental Characterization of a Solar-Photovoltaic-powered Aquaponic System: A Case Study in Bogotá, Colombia

Lissette Lirieth De León
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
lissette.deleon1@utp.ac.pa

Jinela González
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Electrical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
jinela.gonzalez@utp.ac.pa

Giacomo Barbieri
Department of Mechanical Engineering
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
g.barbieri@uniandes.edu.co

Andrés González Mancera
Department of Mechanical Engineering
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
angonzal@uniandes.edu.co

Miguel Chen Austin
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
miguel.chen@utp.ac.pa

Dafni Mora
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
dafni.mora@utp.ac.pa

Freddy Zapata Vanegas
Faculty of Design
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
fzapata@uniandes.edu.co

***Abstract*— According to the Food and Agriculture Organization (FAO), the growth in the world's population will increase the challenge of food security. Therefore, a sustainable strategy is required as an option for traditional agriculture, such as aquaponic systems. In the present study, the experimental characterization of an existing aquaponic system at the Universidad de Los Andes, Colombia, is carried out. The aim is to propose a methodology to evaluate the energy viability of these systems when they are continuously power supplied by solar energy and achieve their adequate functioning by responding to the biological needs of the unit. In addition, this system is defined as a Minimum Viable Product (MVP). It is a reference for applying a roadmap to Panama according to climatic conditions. It was obtained as a result that the photovoltaic system (PV) coupled with the aquaponic system responds to the biological needs of the organisms. However, it has opportunities for improvement, such as battery capacity.**

Keywords—aquaponics systems, renewable energy sources, sustainable

I. INTRODUCTION

The world's population is expected to increase to 10 billion by 2050, according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [1]. The above raises the challenge of having a population with access to food, that is, having food security. FAO defines the latter as the ability of people to have food on an ongoing basis [2]. FAO has also established in its strategic framework 2022-2031 the importance of food security. However, producing safe food must be inherent in coping with climate challenges, building community resilience, and responsible management of natural resources. According to their recent report "Thinking about the future of food safety" [3], techniques evolve to anticipate, absorb and adapt to and around systems and minimize disturbances. In the global framework, particular areas, mainly the undeveloped ones, are limited to food security due to economic, social, and cultural factors. When developed areas seek to supply undeveloped ones, difficulties may also arise due to political factors or logistics of food production, distribution, and storage.

Consequently, the food that may ingest does not have the proper sanitary to survive. It has been proven that about one billion cases of food poisoning are reported annually. Children account for half of the cases of diseases due to inadequate nutrition, with an increased risk of death and suffering from chronic diseases [4]. On the other hand, the COVID-19 pandemic has increased the food crisis. By 2020, more than 500 million people were registered with malnutrition globally, with Africa and Asia being the most affected continents [5]. Reversing these numbers requires a plan involving sustainable strategies and low operating costs. It is known that the practice of traditional agriculture is considered unsustainable due to its adverse effects linked to the demand for resources such as soils, water, and labor, so it has begun to use alternatives that mitigate these scourges [6]. Likewise, the search and implementation of production alternatives help to respond to indicators and targets of the Sustainable Development Goals (SDG 2: Zero hunger and SDG 12: Responsible consumption and production).

For its part, aquaponics has promised to be a best practice in terms of its impact on the environment. The term refers to the integration of aquaculture and hydroponics into a single plant production system, where between 50% to 80% of the

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00091

nutrients of plant cultivation arise from the disposal of aquatic organisms. The symbiosis between organisms occurs due to the adaptation of components such as mechanical and biological filters, which allow nitrification (conversion of ammonium to nitrate) [7][8][9]. Early aquaponics dates back to the early civilizations of Asia and America by the initiative to implement the deposition of fish to nourish plants through stationary islands or chinampas. Subsequently, by the '70s, Europe integrated recirculating aquaculture systems with hydroponics. However, his scientific studies were limited during the last decades of the twentieth century, and it was from 2010 when research began to give significant advances [10][11]. Therefore, it is still an innovative technology for producing food, such as vegetables, fruits, or edible herbs [12]. Aquaponics is generally considered a sustainable practice, mainly because of its benefits [7][13][14]: obtaining two products from a nitrogen source; efficiency in the use of water; does not require soil, fertilizers, or chemical pesticides; higher level of biosecurity; important control of production, which leads to lower losses; production in regions with unfavorable geographical points for cultivation; development in rural, urban and peri-urban environments; creation of little waste; economic production for commercial or self-consumption purposes; provision of jobs in the design phases, construction, operation, and maintenance. Despite the benefits named, it has been found that one of its main environmental loads is the use of electricity to power the components required for its operation and monitoring. The latter can be developed with an intelligent and automated process, where data can be captured remotely and incorporating a control system that regulates the conditions [16][17]. The instrumentation design includes water pumps, lighting, filters, temperature, pH, level, and humidity sensors. The design depends on the scale (size of the population benefited) and renewable or non-renewable energy availability to power the system. In addition, it is essential to identify the species of fish that will be used during the design period of the aquaponic system because this varies according to the location and desired temperatures. So it does not consider that it increases energy costs to achieve its adaptation through heating or cooling water systems [17].

Solar energy is suggested as a power source as a solar collector (to heat water) or electrical energy to supply the installed equipment. Solar energy is an appropriate alternative for an aquaponic system because it contributes to the sustainability sought, avoids using fossil fuels, and does not generate noise pollution. In addition, its application has grown over the years. By 2021, 2% of global energy demand was covered by solar energy; in 2019, this was just 0.7% [18][19].

The Universidad de Los Andes (Bogotá, Colombia) has an agronomic laboratory (AgroLab). Plant production occurs under controlled environments and implements four crop alternatives: planting in materas, hydroponics, aquaponics, and farmbot [20][21]. AgroLab, promoting the cultivation in cities, seeks an interdisciplinary contribution with the realization of proposals that contribute to communities and are channeled into the sustainable energy production route that has been marked and improves the low competitiveness and decreases the presence in the agricultural market [22]. This research takes as a case study the aquaponic system installed in the AgroLab, whose operation is integrated with photovoltaic solar energy. The main objective is to propose a methodology to evaluate the energy viability of aquaponic systems powered continuously by solar energy. This methodology is applied to the case study of the Universidad de Los Andes aquaponic module for its validation and operation. In the first instance, the project is executed as a Minimum Viable Product (MVP) to scale and apply in urban and peri-urban areas. This preamble covers the first phase of the Lean Startup methodology, which involves construction, where the product is obtained, and then measured and learned, according to the data collected, to establish improvements [23]. How the measurement of the product is executed corresponds to the methodology based, which includes the design of the coupling of the photovoltaic system, terminals of the pumping system, and the devices for monitoring electrical indicators. Its energy viability is validated, through the analysis of data collected in the monitoring, to determine if the electrical power values meet the requirements of the pumping system to provide adequate performance. In the same way, other parameters additional to energy performance can be evaluated since the development of an aquaponic system prototype opens the bar to spread awareness about good nutrition, and by integrating an energy-clean technology, sustainable engineering is promoted. Therefore, these last factors must be considered when validating your application.

II. METHODOLOGY

This section presents the proposed work strategy based on the Lean Startup methodology. First, the case study is described, then the energy needs based on biological criteria are analyzed, and, in addition, the characterization of the photovoltaic and pumping system is described.

A. Case study

The aquaponic system is located in the agronomic laboratory of the Universidad de Los Andes (UNIANDES) at 4° 36' 9.48" north latitude, and 74° 3' 59.63" west longitude was the scenario to carry out the research. Has three stations, each composed of a water tank of 500 L and three plant beds whose bases are made up of arlita. These are installed vertically to allow the recirculation of water. In addition, each station comprises three photovoltaic panels, a charge regulator, and a battery; this set is known as a solar tree.

The case study considered only one of the three stations to evaluate the coupling of the photovoltaic system with the pumping system. The species of vegetable character located this season correspond to tomato, peppermint, and lettuce plants, whereas the fish belong to the Carp species, specifically the Koi breed. Universidad de Los Andes comprises a committee in charge of protecting animals, based on Law 84 of 1989 and recommendations established in "The Guide" on December 3, 2013, with the endorsement by the Legal Directorate of the University [24]. Therefore, to have the power to incorporate animals into the case study, prior approval was obtained by the committee. As for food production, this project belongs to the work plan called Alimentos Con-Ciencia, which corresponds to space to expand knowledge and the search for new strategies focused on strengthening food security [25].

For the execution of this research, the Lean Startup methodology was taken as a reference, which proposes an MVP preparation. After its design, it is subjected to measurements that, in this case, consisted of analyzing the energy viability based on biological criteria. Finally, this methodology proposes learning the measures and establishing recommendations for improving the system in future aquaponic installations. The design of the station studied is

shown in Fig. 1. The development of the system's evaluation was divided into three stages. First, assess the energy needs according to the biological criteria of the system. The photovoltaic system was characterized by using a monitoring system to obtain information on the irradiance, voltage, and current in the photovoltaic system. Subsequently, the characterization of the pump used in the aquaponic culture was performed and determined its operating characteristics. Finally, in the analysis of results, the coupling of the integrated system is described considering its biological needs.

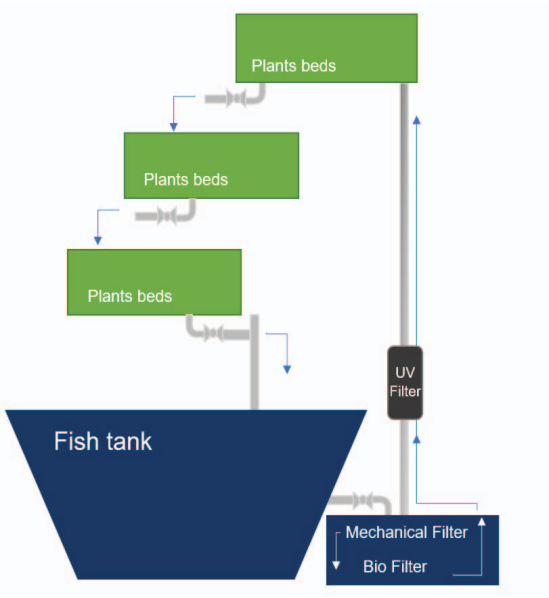


Fig. 1. Design of the station of the aquaponic system.

B. *Energy needs based on biological criteria*

In an aquaponic system, water circulates and passes through a mechanical filter, separating the solid waste generated by the fish. The plant's main nutrient base corresponds to nitrogen due to its high amount of amino acids, proteins, and nucleic acids and its intervention in producing chlorophyll [26]. This element is present as nitrogen gas (N_2), which is introduced into the system through fish feed; however, to be usable by the plants, a further conversion is required. N_2 becomes ammonia (NH_3) or ammonium (NH_4^+), depending on the pH, in fish waste. These compounds cannot rest in water due to the high level of toxicity to fish and must undergo biochemical conversion to reach the required nutrient phase. The biological filter transitions between biochemical compounds using two groups of bacteria. First, there are the ammonia-oxidizing bacteria (AOB) that carry NH_3 to nitrite (NO_2^-), which is also harmful to fish; then, NO_2^- is transformed into nitrate (NO_3^-) by the second group of nitrite bacteria (NOB) being the final product necessary for the development of plants [11]. Nitrification provides these essential indicators in which the determination of the correct functioning of the mechanical systems included in the aquaponic system converges. Levels of NH_3 or NH_4^+, NO_2^-, NO_3^- help determine whether existing recirculation is desirable or should take measures to prevent toxic sediments from remaining in the fluid. Table I shows the optimal ranges of these biological indicators for each type of organism in the aquaponic system individually (bacteria, fish, and plants). At the scale of the aquaponic system, it is recommended levels of: $NH_3 < 0.05$ mg/L, pH (6.0 – 7.0), water temperature (18 – 30 °C), dissolved oxygen DO (> 5 mg/L), $NO_2^- < 1$ mg/L and NO_3^- (5 – 150 mg/L) [11] [27][28].

TABLE I. OPTIMAL RANGES OF BIOLOGICAL INDICATORS BY ORGANISM TYPE IN AN AQUAPONIC SYSTEM

Organisms	NH_3 [mg/L]	NO_2^- [mg/L]	NO_3^- [mg/L]	T [°C]	DO [mg/L]	pH
Bacteria	< 3	< 30	-	20-25	4-8	6-7
Warm water fish	< 0.05	< 1	<300	25-27	4-6	6-7
Cold water fish	< 1	< 0.1	<300	10-18	≥ 1	6-7
Plants	< 3	< 1	-	16-30	≥ 3	5.5-7.5

On the other hand, aquaponic units densely populated should have a water recirculation rate of twice per hour, while, for low densities, water should recirculate at least once per hour [8]. The case study has a low population density (<15 kg/m^3) in the 500 L capacity tank, thus defining that the maximum pump flow rate should be 500 L/h. The fishes (koi carp) in the UNIANDES aquaponic system are not used for consumption and are considered from cold climates (10 to 25°C), so they do not need auxiliary heating devices or aerators.

This is summarized in the biological needs of the system, which must be assisted by devices that guarantee compliance with acceptable ranges. Thus, the case study only needs to feed the recirculation pump energetically and a UV sterilizing filter to prevent algae and other harmful microorganisms.

C. *Characterization of the photovoltaic system*

The three solar panels of the existing photovoltaic installation are connected in parallel and correspond to an ODA080W18P model with 1) Maximum power: 80 W, 2) Maximum voltage: 18.30 V, 3) Maximum current: 4.38 A, 4) Open circuit voltage: 21.96 V, 5) Short circuit current: 4.73 A, 6) Cell materials: Poly-Si, 7) Dimensions: 780x668x30 mm. The array is connected to an OLMO ICM 3024 charge controller, regulating the transfer of electrical energy to a 35 Ah AGM 12V battery, which a 12V DC submersible pump must power. Not consider the UV sterilizer filter within the electrical loads of the system since AC powers it.

Used an Eppley Precision Spectral pyranometer Model PSP to measure global solar irradiance and took data per second. Subsequently, these were averaged per minute for analysis. Compared the irradiance data with the irradiance values provided by the Lufft WS501 BM system: RS485-2 in the PV Andes installation using the MeteoControl platform [29]. Validation was performed using a statistical analysis using the coefficient of determination (R^2) to assess the fit between the two data sets. To define a correct fit, that is, a high approximation between the data, R^2 must be close to one.

The data acquisition process was carried out remotely through a Kangaroo Plus mini-PC, configured to be used from another computer with Windows 10 operating system using AnyDesk software, which allowed remote connection with the mini-PC. The Kangaroo Plus was connected to a NI cDAQ-

9174 chassis with three National Instruments s cards: NI-9215 for irradiance, NI-9221 for voltage, and NI-9227 for current. Fig. 2 displays the connection diagram designed to record the monitored data.

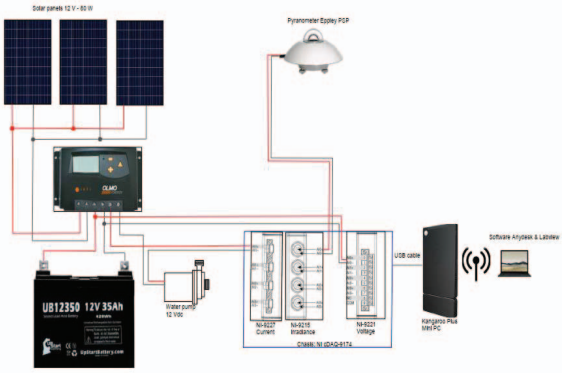


Fig. 2. Connection diagram for data monitoring in the photovoltaic system.

The NI cDAQ-9174 chassis is powered directly from the mains. The NI-9125 card was connected in parallel with the pyranometer output for irradiance. The voltage output was measured in parallel to the battery by implementing the NI-9221 card. The measured voltage was converted to irradiance units [W/m^2] via the pyranometer constant (8.67x10-6 Vm^2/W). Finally, the load current was measured in series by the NI-9227 card. Used the Measurement and Automation Explorer (MAX) software to record the measurements through access to the data acquisition cards. These data were processed by other software (DAQ), where the behavior of the evaluated indicators was visualized.

Monitored the irradiance to identify the sunny and shaded moments to determine the supply voltage by the photovoltaic array and the value of the current of the corresponding load. Thus evaluate the performance of the pumping system in each scenario. The battery configuration is USR (the voltages of each stage can be changed), and the operating hours are set to 15. In the case study, the configuration values found for the battery were 14.4 V for cycle charge or bulk and input to the absorption cycle. The flotation voltage was 13.8 V, and the reconnection voltage was 12.6 V. The connected charge will not turn on until the battery is recharged to this voltage. The low disconnect or cut-off voltage is 10.8 V, protecting the battery from discharges.

D. Characterizacion of circulation pump

To perform the characterization of the device, a test assembly of the fluidic system was carried out. After evaluating the recirculation parameters, the ZAOJIAO pump of 12 V DC was selected, with a nominal flow rate of 800 L/h and a maximum height of 4 m. The tests were carried out taking into account the following variables: volume and time (to perform the flow calculation), pressure, and electric current, for the pump in operation with a voltage of 12 V using a variable power source. For the flow calculation, measured the time of variation of 1 L in the volume of the tank, taking between 4 and 8 samples to calculate the average time, alternating the position of the valve. For the mathematical processing of the data and the construction of the experimental operating curves of the pump, the total dynamic head delivered by the pump is determined, and the general equation of simplified energy for incompressible fluids is used, taking into account the losses in the system.

III. Analysis of Results

A. Characterization of the photovoltaic system

The results from irradiance monitoring were compared with the values obtained by the pyranometer with the MeteoControl center. A coefficient of determination R^2 of 0.77 and an average error of 57 W/m^2 were found to indicate that both data maintain a similar behavior, and the differences raised are due to meteorological variations between the two measurement points. The average daily irradiance value was 327 W/m^2, and the hour of greatest irradiance at the site was approximately 11:00 p.m. from 12:00 p.m. a decrease in the measured values was found, which indicates the existence of shadows in PVs during this period. This is an opportunity for improvement since the elements that can evaluate can avoid shading and losses in the system.

Another factor studied in the PV system was battery life. Considering the capacity (35 Ah), obtained an oversizing of 15%, and 15 hours of operation, a discharge percentage between 33% and 36%. The rate of discharge obtained is adequate, but it is not in the range of optimal values since it is recommended for prolonged battery performance that its release percentage oscillates between 20% to 30% maximum. Therefore, the battery is at the limit of its percentage charge and could develop between 1000 cycles over its entire lifespan (2.7 years).

B. Recirculation pump characterization

Fig. 3 represents the total dynamic head (TDH) curve vs. flow rate of the pump operating at 12 V, connected to the power source, identified that the pump's TDH of 3.28 m. For a hydraulic height of 1.47 m, the system would have a flow rate of 490 L/h, very close to what is recommended by the literature for the installed aquaponic system. However, the calculated flow rate with the pump running in the system at one instant during the day was 0.38 m^3/h (380 L/h). Since the water tank is not fully filled, this capacity allows for proper recirculation, and the corresponding water head is 2.05 m (above the geometric height of 1.70 m), depending on the curve of the pump. Therefore, found both parameters correspond to the operating point of the water pump.

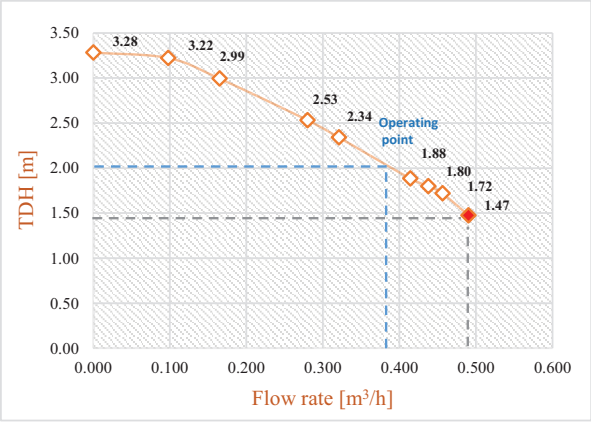


Fig. 3. Experimental curve of the pump. TDH vs. flow rate.

C. *Evaluation of aquaponic system performance coupled with the PV system*

The performance of the pumping system was evaluated through its electrical power, and its compliance with the established biological needs was verified. Fig. 4 indicates that the electrical power must be 8.94 W (Pmin) to reach 380 L/h. Since the measured recirculation was 380 L/h, this value does not offer a high margin of confidence. Therefore, it was considered the minimum capacity to comply with a recirculation per hour.

This electrical power varies depending on the voltage supplied, either by the PV panels or the battery that operates during night periods. The recirculation pump has a nominal voltage and current of 12 V and 1.5 A, respectively. Throughout the day, voltages supplied between 17 V and 20 V were recorded during cloudy and sunny periods, respectively. On the part of the PV, the current of the connected load (water pump) ranged between 0.68 A and 0.77 A.

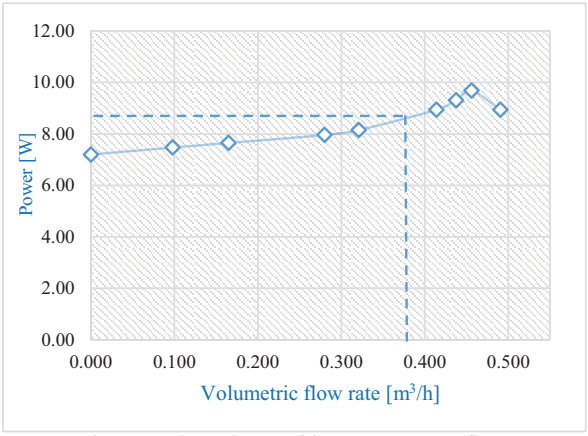


Fig. 4. Experimental curve of the pump. Power vs. flow rate.

The pump's power in both microclimatic scenarios was higher than Pmin; therefore, the minimum recirculation is also met. In the night period, when the process of discharging the battery occurs (gradual decrease in voltage), the electric power per hour. Fig. 5 shows the charging and discharging behavior of the battery during the 15 hours of operation, depending on the electrical power. All the registered values (except one) are below Pmin to achieve an appropriate recirculation. This causes during the nights, the flow is lower, producing recirculation with greater durability over time.

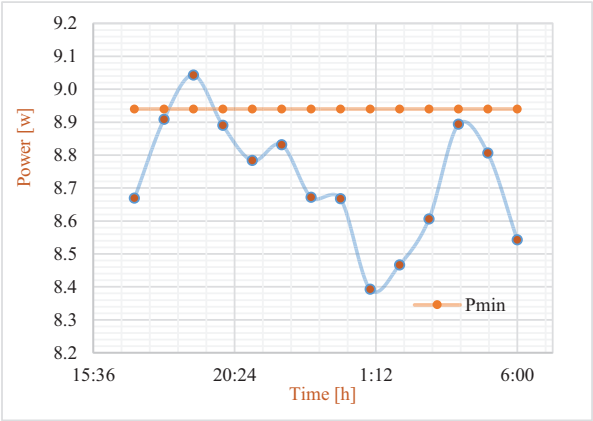


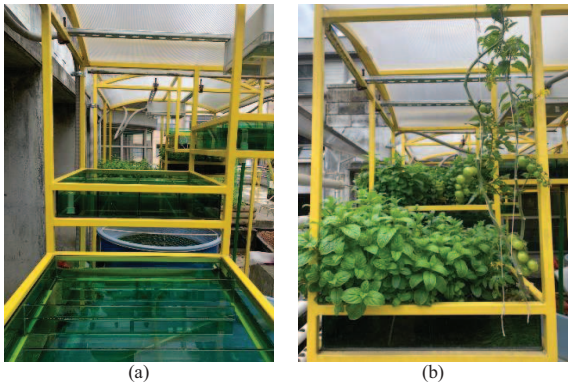
Fig. 5. Battery charge and discharge graph based on power and time.

Under the operation of the battery, the biological needs of the aquaponic system were evaluated since these indicators determine its functionality. In Table II, the values measured in the recirculating water are shown. There is no perceived concentration on the part of the NH_3, NO_2^- and NO_3^- in the return of the fish tank water, that is, the water is purified. The measurement of these indicators was carried out by applying the "API Freshwater master test kit". In addition, a correct balance was determined between the number of fish and plants in the system because the final product of the nitrogen cycle is consumed in its entirety by the plants. On the other hand, a corrector range of temperature and pH of the water was recorded since Koi fish tolerate temperatures between 10 to 25 °C, so it does not need a heater. As for the DO, this species does not require a high oxygen demand, so the concentration recorded is adequate without needing an aerator. The correct ambiance of the species prevented an increase in the energy load of the feeding system. If the measured values are outside the required range, the system must be improved by adapting an auxiliary power supply system or expanding the battery capacity.

TABLE II. MEASURED BIOLOGICAL INDICATORS

Indicators	**NH_3 [mg/L]**	**NO_2^- [mg/L]**	**NO_3^- [mg/L]**	**T [°C]**	**DO [mg/ L]**	**pH**
Aquaponic system	0	0	0	18 – 30	4-8	6-7

The water exchange has not been carried out due to the current excellent state of water quality. On the other hand, after four months of the commissioning of the aquaponic system powered by solar energy, 20% of the total volume of water lost by the natural evaporation process was replenished. It should note that this replacement was made with resting water using a product that removes chlorine and chloramine from the water [30]. Fig. 6 compares the UNIANDES aquaponic system in its initial state and the state after four months in operation with the PV system.



(a) (b)

Fig. 6. Evolution of the aquaponic system in the months of (a) February to (b) June.

IV. Roadmap for the Application of the Methodology in Panama

It has been found for Panama that hydroponics is more developed than aquaponics. To promote this type of alternative crop in the country, a preliminary roadmap is proposed, raising aspects for implementing aquaponic systems. There are currently 13 aquaponic projects registered with the Aquatic Resources Authority in Panama (ARAP in Spanish); an initiative was also found at the Universidad Tecnológica de Panamá in 2019 [31]. The results prove the system is an MVP and works as a reference for replicating or scaling. However, recommendations are extracted that imply improvements within the system and are also reflected in the roadmap (Fig. 7). This was divided into four general aspects: selection of the region, the selection of species, the coupling with solar energy, and the realization of legal aspects.

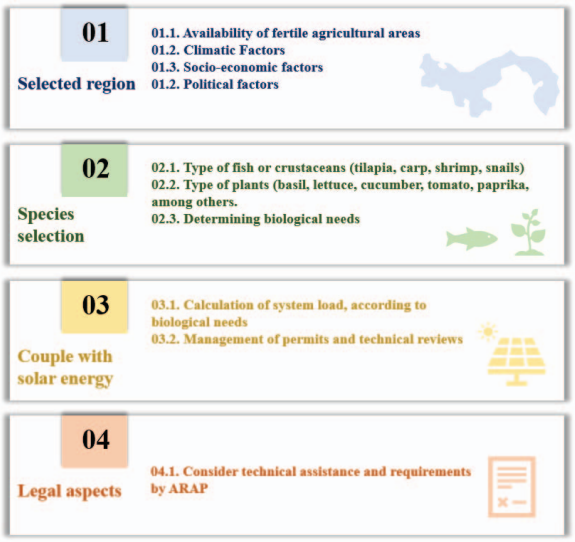


Fig. 7. Roadmap for the realization of aquaponic projects in Panama.

V. Conclusions

The main conclusions of the study are described in this section.

An existing aquaponic system at the Universidad de Los Andes (Bogotá, Colombia) was used as a case study to propose a methodology for evaluating the energy viability of aquaponic systems continuously powered by solar energy and for the execution of the Minimum Viable Product (MVP) project. Monitoring the irradiance at the point of the case study and its comparison with the meteorological data of the region allowed us to identify the moments of shadows to know the photovoltaic performance in those moments. Results obtained from the characterization of the photovoltaic and recirculation system indicate that there is compliance with the minimum requirements of system recirculation during the day, even in cloudy conditions. On the contrary, during the night period (battery operating as a power source), a full range of the required capacity is not given. However, according to the biological criteria of the aquaponic system as a whole (bacteria, fish, and plants) measured, it is possible to meet the optimal nitrification process and, therefore, the symbiosis of the organisms. This can be explained since there are other biological factors on the part of the species (density of fish and portion of plants) that influence the biological criteria of the aquaponic system. In this way, it's defined that the requirement of a specific recirculation capacity to avoid intoxication becomes slightly flexible because the quality of the water also depends on the conditions of the species and their ability to produce (by the fish) and absorb (by the plants) the compounds involved in nitrogen process. Therefore, if there is a correct chemical balance and an acceptable recirculation, adequate functioning by the aquaponic system is considered. However, since the operation of the battery is positioned as a limitation in the project, the use of auxiliary sources or the expansion of the battery bank must be taken into account in case of projects with different energy requirements or those oriented to complete energy sustainability.

Acknowledgment

This work was funded by the Directorate of International Relations of the Technological University of Panama and the National Secretariat of Sciences and Technology (SENACYT) through the call for Outgoing International Mobility UTP-SENACYT 2021 and by the Energy and Comfort in Bioclimatic Buildings group of the Faculty of Mechanical Engineering (ECEB). In addition, the Department of Mechanical Engineering of the Universidad de Los Andes in Colombia is thanked for the academic and administrative support provided during the research internship to realize the study in situ, and to Yeferzon Ardila B.A.Sc. Analyst of the Neurosciences and Circadian Rhythms Laboratory for his contribution in the technical part of the aquaponic system and the fish involved in the study.

References

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "The World's Future Food Security Is in Jeopardy Due to Multiple Challenges," Rome, February 22, 2017.

[2] U. Mc Carthy, I. Uysal, R. Badia-Melis, S. Mercier, C. O'Donnell, and A. Ktenioudaki, "Global food security – Issues, challenges, and technological solutions," *Trends Food Sci. Technol.* , vol. 77, pp. 11–20, 2018, doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.002.

[3] "Thinking about the future of food safety A foresight report," doi: 10.4060/cb8667en.

[4] F. Fung, H. S. Wang, and S. Menon, "Food safety in the 21st century," *Biomed. J.* , vol. 41, no. 2, pp. 88–95, 2018, doi: 10.1016/j.bj.2018.03.003.

[5] United Nations, "Global hunger increases during the pandem," Jul. 2021.

[6] A. J. Hati and R. R. Singh, "Smart Indoor Farms: Leveraging

Technological Advancements to Power a Sustainable Agricultural Revolution," *AgriEngineering*, vol. 3, no. 4, pp. 728–767, 2021, doi: 10.3390/agriengineering3040047.

[7] H. Nishiyama, A. Nagata, Y. Matsuo, and R. Matsuo, *Small-scale aquaponic food production Integrated fish and plant farming*, vol. 222, no. 14. 2019.

[8] G. F. M. Baganz *et al.* , "The aquaponic principle—It is all about coupling," *Rev. Aquac.* , vol. 14, no. 1, pp. 252–264, 2022, doi: 10.1111/raq.12596.

[9] C. Somerville, M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, and A. Lovatelli, *Small-scale aquaponic food production*, vol. 222, no. 14. Roma, 2014.

[10] L. C. A. Naegel, "Combined production of fish and plants in recirculating water," *Elsevier Sci. Publ. Co.* , vol. 10, no. 1, pp. 17–24, 1977, doi: 10.1016/0044-8486(77)90029-1.

[11] R. Junge, N. Antenen, M. Villarroel, T. Griessler Bulc, A. Ovca, and S. Miliken, "Aquaponics: Textbook for Higher Education," *Zenodo*, 2020, doi: 10.5281/zenodo.3948824.

[12] S. A. A. Abusin and B. W. Mandikiana, "Towards sustainable food production systems in Qatar: Assessment of the viability of aquaponics," *Glob. Food Sec.* , vol. 25, no. August 2019, p. 100349, 2020, doi: 10.1016/j.gfs.2020.100349.

[13] A. Rizal, Y. Dhahiyat, Zahidah, Y. Andriani, A. A. Handaka, and A. Sahidin, "The economic and social benefits of an aquaponic system for the integrated production of fish and water plants," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* , vol. 137, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/137/1/012098.

[14] A. Siegner, J. Sowerwine, and C. Acey, "Does urban agriculture improve food security? Examining the nexus of food access and distribution of urban produced foods in the United States: A systematic review," *Sustain.* , vol. 10, no. 9, pp. 8–12, 2018, doi: 10.3390/su10092988.

[15] M. N. Mamatha and S. N. Namratha, "Design & implementation of indoor farming using automated aquaponics system," *2017 IEEE Int. Conf. Smart Technol. Manag. Comput. Commun. Control. Energy Mater. ICSTM 2017 - Proc.* , vol. 2, no. August, pp. 396–401, 2017, doi: 10.1109/ICSTM.2017.8089192.

[16] T. Shafeena, "Smart Aquaponics System: Challenges and Opportunities," *Eur. J. Adv. Eng. Technol.* , vol. 3, no. 2, pp. 52–55, 2016, [Online]. Available: https://ejaet.com/smart-aquaponics-system-challenges-and-opportunities/.

[17] S. Goddek, B. Delaide, U. Mankasingh, K. V. Ragnarsdottir, H. Jijakli, and R. Thorarinsdottir, "Challenges of sustainable and commercial aquaponics," *Sustain.* , vol. 7, no. 4, pp. 4199–4224, 2015, doi: 10.3390/su7044199.

[18] H. Ritchie and M. Roser, "Renewable Energy." Our world in data, [Online]. Available: https://ourworldindata.org/renewable-energy.

[19] S. Dixit, "Solar technologies and their implementations: A review," *Mater. Today Proc.* , vol. 28, pp. 2137–2148, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.134.

[20] F. Zapata, G. Barbieri, Y. Ardila, V. Akle, and J. Osma, "Agrolab : a Living Lab in Colombia for Research and Education in Urban," no. November, 2019.

[21] V. A. Murcia, J. F. Palacios, and G. Barbieri, "FarmBot Simulator: towards a Virtual Environment for Scaled Precision Agriculture," 2021.

[22] J. D. Ardila Cruz, "Structural Design for an Aquaponic/Hydroponic and Solar-Powered System," *instnameUniversity of the Andes*, 2019.

[23] F. J. Llamas Fernández and J. C. Fernández Rodríguez, "La metodología Lean startup: desarrollo y aplicación para el emprendimiento," *Rev. Esc. Adm. Negocios*, no. 84, 2018, doi: 10.21158/01208160.n84.2018.1918.

[24] Medical and Occupational Health Department, "Institutional Committee for the Care and Use of Laboratory Animals CICUAL-UNIANDES." https://neuro.uniandes.edu.co/paginas/page/PAG_CICUAL.htm.

[25] F. Zapata, "Alimentos Con-Ciencia: Modelo sostenible de creación sin fronteras de diálogos inter y transdisciplinarios en torno a la producción de alimentos." https://arqdis.uniandes.edu.co/investigaciones/alimentos-con-ciencia/.

[26] O. Barrera and M. Sáenz, "El aprovechamiento del nitrogen por la planta con tecnología N-HIB®," *Rev. Ingenio*, vol. 12, no. 1 SE-Artículos, pp. 85–99, 2016, [Online]. Available: https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2127.

[27] M. W. Puteri Edaroyati, H. Siti Aishah, and A. M. Al-Tawaha, "Requirements for inserting intercropping in aquaponics system for sustainability in agricultural production system," *Agron. Res.* , vol. 15, no. 5, pp. 2048–2067, 2017, doi: 10.15159/AR.17.070.

[28] H. Y. Yildiz, L. Robaina, J. Pirhonen, E. Mente, D. Domínguez, and G. Parisi, "Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-A review," *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, pp. 1–17, 2017, doi: 10.3390/w9010013.

[29] Universidad de los Andes, "Sistema FV Andes 80kWp MeteoControl." .

[30]Seachem, "prime @ www.seachem.com." https://www.seachem.com/prime.php.

[31] A. Herrera de Palma, I. Caballero, J. García, and E. Gordón, "Desarrollo de un sistema acuapónico sostenible para el consumo en la Universidad Tecnológica de Panamá," *Mem. ponencias la Jorn. Scientific Initiation, Selection Nac. and Preselection*, 2019.

Phosphorous retention and amorphous iron and aluminum contents in volcanic soils from Chiriqui and Cocle, Panama

Retención de fósforo y contenidos de hierro y aluminio amorfos en suelos volcánicos de Chiriquí y Coclé, Panamá

Manuel Morán
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
manuel.moran@utp.ac.pa

Melisabel Muñoz
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
melisabel.munoz@utp.ac.pa

José Fábrega
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigadores
Panamá, Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

Jorge A. Leiva
Escuela de Agronomía
Universidad de Costa Rica
Liberia, Costa Rica
jorge.leivasanabria@ucr.ac.cr

Abstract — Volcanic soil samples from the provinces of Chiriqui and Cocle in Panama were characterized for their andic soil properties: bulk density, phosphorus retention, and amorphous Fe and Al content. The samples were equilibrated in a 1000 mg-P L^{-1} solution and extracted with pH3 ammonium oxalate solution. All samples were pretreated and diluted for measurement in Hach TNT844, TNT848, and TNT858 vials on a Hach DR1900 spectrophotometer. The Chiriqui samples showed higher P retention (up to 83.18%), as well as higher amorphous Fe and Al contents, with values equal to or greater than 2%. Bulk densities were less than 0.9 g cm^{-3}. The data confirmed that the Chiriquí soils presented all the requirements for the Andisol soil order (USDA Soil Taxonomy). The Coclé soils presented higher bulk density values, lower P retention (up to 60.2%) and lower amorphous Fe or Al content, with values less than 2%, which showed that they are older deposits of volcanic ash with advanced weathering. The characterization of andic properties provides useful tools to local stakeholders for soil fertility management and land use planning. Hach's wet chemistry vials and spectrophotometric method of determining P, Fe, and Al could reduce reagent costs and analysis time.

Keywords— soil fertility, nutrients, Andisols, volcanic soils, soil taxonomy, soil characterization.

***Resumen* — Muestras de suelos volcánicos de las provincias de Chiriquí y Coclé en Panamá se caracterizaron en sus propiedades ándicas: densidad aparente, retención de fósforo y contenido de Fe y Al amorfos. Las muestras se equilibraron con solución de 1000 mg-P L^{-1} y se extrajeron con solución de oxalato de amonio pH3. Todas las muestras fueron pretratadas y diluidas para la medición en viales Hach TNT844, TNT848 y TNT858 en un espectrofotómetro Hach DR1900. Las muestras de Chiriquí mostraron mayor retención de P (hasta 83.18 %), así como mayores contenidos de Fe y Al amorfos, con valores iguales o mayores a 2%. Las densidades aparentes fueron inferiores a 0,9 g cm^3 . Los datos confirmaron que los suelos de Chiriquí presentaron todos los requisitos para el orden Andisol (Taxonomía de Suelos del USDA). Los suelos de Coclé presentaron mayores valores de densidad aparente, menor retención de P (hasta 60.2 %) y menor contenido de Fe o Al amorfos, con valores menores al 2%, lo que evidenció que son depósitos más antiguos de cenizas volcánicas y un estado de meteorización avanzado. La caracterización de las propiedades ándicas proporciona herramientas útiles a los actores locales para la gestión de la fertilidad del suelo y la planificación del uso de la tierra. El método espectrofotométrico de determinación de P, Fe y Al en viales de química húmeda de Hach podría reducir los gastos en reactivos y tiempo de análisis.**

Palabras claves — fertilidad de suelos, Andisoles, suelos volcánicos, Taxonomía de suelos, caracterización de suelos

I. INTRODUCCION

Panamá presenta severos problemas de erosión y deterioro del suelo, tal como se presenta en el atlas de tierras secas y degradadas de Panamá del Ministerio del Ambiente, debido al proceso creciente y acumulativo de degradación que sufren casi todas las cuencas y suelos del territorio nacional [1]. Esto se debe a la intervención de la mano del hombre en diversas actividades (domésticas, industriales y comerciales) que aumentan el proceso de erosión, especialmente erosión hídrica por escorrentía superficial.

Tradicionalmente, la subcuenca del río Zaratí (SRZ) ha sido explotada por diferentes actividades agrícolas, ganaderas y agroindustriales, donde los componentes ambientales como el suelo, se encuentran en un proceso de degradación y deterioro, principalmente debido al mal manejo de la información sobre el estado del suelo, lo que se refleja en el

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00092

desarrollo de actividades antropogénicas de manera inadecuada que, relacionadas con factores ambientales, aumentan los efectos negativos [2].

El fósforo (P) es un elemento fundamental para el desarrollo y crecimiento de las plantas y animales e importante durante la división y crecimiento celular, por lo que una deficiencia provoca una reducción en el crecimiento temprano de las plantas, lo que influye directamente en la producción agrícola [3]. La movilidad del fósforo en el subsuelo poco profundo es un tema de importancia crítica y complejidad considerable y su importancia se deriva del hecho de que el P es generalmente escaso [4]. Además, los suelos volcánicos o Andisoles tienden a presentar una mayor retención de P al compararse con otros suelos, ya que contienen grandes cantidades de arcillas amorfas o de baja cristalización, también llamadas alofanas [5]. Los Andisoles son suelos muy productivos, pero tienen una alta retención de P y contenidos bajos de P disponible para las plantas [6].

El aluminio (Al) puede tener un efecto beneficioso o tóxico sobre los organismos vivos dependiendo de las condiciones o forma química que se encuentre, presencia de otros metales y la capacidad de crecimiento y desarrollo de las plantas [7]. El Al en altas concentraciones en la solución del suelo provocan una disminución en el desarrollo de las raíces, que trae como consecuencia que las plantas reduzcan su capacidad de absorber nutrientes y, por lo tanto, fósforo. [8].

Las diversas formas de hierro (Fe) ejercen una marcada influencia en las propiedades de los suelos, teniendo un impacto importante en su génesis y evolución, y propiedades de fertilidad [9]. La mayoría de los suelos volcánicos contienen una abundancia de Fe que se aprovecha en los sistemas vivos como un elemento menor. Sin embargo, el Fe es un constituyente esencial de varias enzimas celulares, en particular las asociadas con los procesos respiratorios.

El estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo es de gran relevancia para el manejo agropecuario y forestal y otras actividades productivas en las cuencas hidrográficas, ya que, la falta de nutrientes y la baja fertilidad impactan directamente en el crecimiento de las plantas.

El objetivo de este estudio fue caracterizar propiedades ándicas (densidad aparente, retención de P, Fe y Al amorfos) en suelos de origen volcánico de la subcuenca del río Zaratí (Coclé) y de la provincia de Chiriquí, como parte de un estudio hidrológico y pedológico de la SRZ. Las diversas propiedades físicas, químicas y biológicas confieren al suelo la calidad necesaria para sostener la vida y mantener la capacidad productiva para el desarrollo de las actividades agrícolas, funciones que no se pueden cumplir de manera efectiva cuando intervienen fenómenos de degradación como la erosión, la compactación y la reducción de componentes básicos como la fertilidad y la biodiversidad [10].

II. MATERIALES Y METODOS

A. *Área de estudio*

El estudio de caracterización de propiedades ándicas en suelos volcánicos consistió en examinar 40 muestras de suelos, de las provincias de Coclé y Chiriquí en la República de Panamá (Figura 1); donde 30 fueron obtenidas de 6 sitios dentro de la subcuenca del rio Zaratí (Figura 2) a través de calicatas (fosa de observación) donde se realizó el muestreo de los primeros cinco horizontes del perfil del suelo. Las muestras de suelo fueron obtenidas previamente por parte de Digna González y Carlos Santana en su tesis: "Clasificación pedológica en la subcuenca del río Zaratí para el desarrollo de buenas prácticas de conservación de los suelos"[2]. Por otro lado, las 10 muestras restantes fueron recolectadas en suelos superficiales (10 cm de profundidad) en una gira de campo en las comunidades de Volcán y Boquete, en la Provincia de Chiriquí. Todas las muestras, fueron secadas al horno por 24 horas, a 105 °C, y tamizado a 2 milímetros.

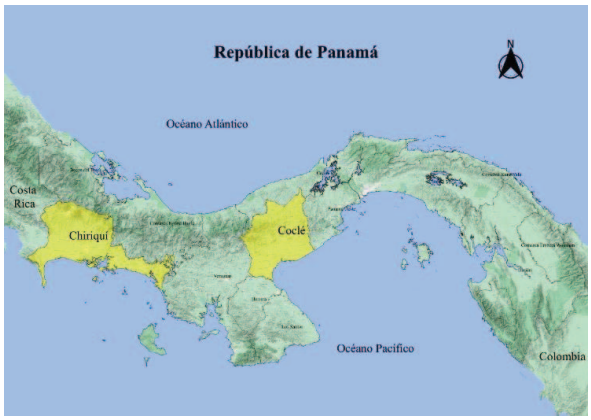


Figura 1. Las muestras fueron recolectadas en las provincias de Coclé y Chiriquí, Panamá.

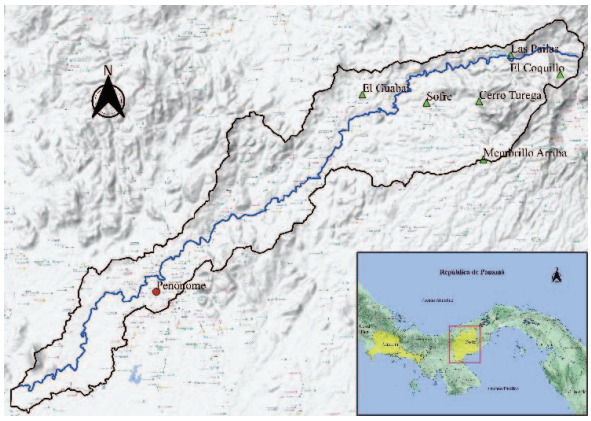


Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo dentro de la subcuenca del rio Zaratí en el distrito de Penonomé, provincia de Coclé, Panamá.

Las extracciones y determinaciones de P, Al y Fe fueron realizadas en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá y en el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas.

B. *Análisis de retención de fósforo*

Para el análisis de retención de fósforo, se utilizó el método de Blakemore [11] y se implementaron algunas modificaciones para utilizar los kits TNT Hach. En general, el procedimiento consistió en preparar una solución inicial concentrada de PO_4^{-3} (equivalente a 1000 mg P L^{-1}). En tubos de centrífuga se pesó 5 g de muestra y se agregó 25 ml de la solución. Los tubos de centrífuga se colocaron en agitador horizontal por 16 horas a 20 °C a 200 revoluciones por minuto (rpm). Luego, se los tubos se centrifugaron por 15 minutos a 2000 rpm. Una vez centrifugado, se extrajo una alícuota de 10 µL del supernatante y se colocó en un tubo de ensayo, donde

fue diluida 200X con agua desionizada. A continuación, se utilizó el procedimiento para ortofosfato reactivo en viales HACH TNT 844 [12], los cuales usan la técnica del azul de fosfomolibdeno reducido por ácido ascórbico. La lectura de la concentración se realizó con el espectrofotómetro HACH disponible en el laboratorio (modelo DR 6000). Todas las muestras fueron analizadas en duplicado.

C. Análisis de hierro y aluminio amorfo

El análisis de contenido de hierro y aluminio amorfo utilizó el método de extracción en oxalato de amonio pH 3 [11] con algunas modificaciones para utilizar los viales TNT de Hach. Se pesaron 0.4 g de suelo y se colocaron en el tubo de centrífuga junto a 40 mL de la solución extractora. Los tubos de centrífuga se colocaron en el agitador horizontal por 4 horas, sin exposición a la luz, de 180 a 200 oscilaciones por minuto. Luego, fueron centrifugados a 2000 rpm por 5 minutos.

En el análisis de Al se extrajo una alícuota de 10 µL del supernatante centrifugado, se colocó en un tubo de ensayo de 10 mL y se diluyó 1000x con agua desionizada. En el caso del análisis de Fe, se extrajo una alícuota de 200 µL de la muestra centrifugada, se colocó en un tubo de ensayo de 10 mL y se diluyó 50x con agua desionizada. Luego, se utilizaron los viales Hach TNT 848 [13] y TNT 858 [14], para medir Al y Fe, respectivamente. Ambos viales consisten en técnicas colorimétricas donde la primera se basa en la técnica del cromazurol S y el segundo en la técnica de fenantrolina. En ambos análisis, se utilizó un espectrofotómetro Hach (modelo DR 1900) disponible en el laboratorio.

D. Control de calidad

Las muestras fueron analizadas en duplicado para evaluar la repetibilidad del método. Asimismo, se realizaron pruebas de recuperación con muestras fortificadas (0.1 mg L^{-1} para Al y 1.0 mg L^{-1} para Fe) en el método de extracción en oxalato de amonio a pH 3. Esta fortificación usó patrones de referencia analítica (Sigma Aldrich) de Fe (1000 mg L^{-1} de Fe $(NO_3)_3$ en HNO_3 0.5 M) y Al (1000 mg L^{-1} Al $(NO_3)_3$ en 2 % HNO_3), así como soluciones patrón diluidas para fortificar los extractos centrifugados.

En el análisis de muestras fortificadas con aluminio se extrajo una alícuota una de 20 µL del supernatante centrifugado y filtrado, se colocó en un tubo de ensayo de 20 mL, se fortificó con una solución patrón de Al (usando micropipetas) y se diluyó 1000x con agua desionizada. Por otro lado, para el análisis de hierro se extrajo una alícuota de 800 µL, muestra centrifugada y filtrada, se colocó en un tubo de ensayo de 20 mL, se fortificó con una solución patrón y se diluyó 25x con agua desionizada. Posteriormente, se emplearon los viales Hach TNT 848 y 858.

El cálculo de porcentaje de recuperación (% R) de las pruebas de fortificación, se utilizó la siguiente formula [15]:

$$\% R = ((C_F - C_A) / C^*_A) \quad (1)$$

Donde:

C_F = Concentración de la muestra fortificada (mg L^{-1})

C_A = Concentración de la muestra (mg L^{-1})

C^*_A = Nivel de fortificación (mg L^{-1})

Normalmente el % R se emplea para evaluar la recuperación del analito presente o agregado a una muestra como control de calidad, evaluando la eficiencia de extracción, proceso de preparación o interferencias que pueden existir al aplicar el método de ensayo [16].

E. Análisis de resultados

Los datos fueron analizados con estadística descriptiva general. No se realizaron pruebas de hipótesis, experimentos, ni comparación de medias. Las diferencias encontradas entre las cantidades de Al y Fe de las muestras fortificadas corresponden al valor de recuperación y sensibilidad del método usado, el cual se indica en porcentaje. [16]. De hecho, el porcentaje de recuperación mostró valores mínimos de 90% y máximos de 121% para los análisis de Al y Fe, lo cual confirmó que la técnica utilizada fue válida y precisa.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 presenta los resultados de caracterización de las propiedades químicas evaluadas (fósforo, hierro y aluminio) en las muestras de suelos de la Subcuenca del Río Zaratí. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para las muestras de suelos de la provincia de Chiriquí.

En general, los suelos de SRZ (Tabla 1) presentaron densidades aparentes relativamente altas (1.12 a 1.77 g cm^{-3}), las cuales tienden a incrementar con la profundidad del suelo. Por otro lado, los suelos de Chiriquí (Tabla 2) presentaron densidades mucho menores (excepto la muestra Volcán 1) entre 0.52 a 0.81 g cm^{-3}, más acordes con las propiedades ándicas normales.

La retención de fósforo en las capas superficiales de las calicatas (SRZ) varió entre 25 y 48%, con los valores mayores en Las Pailas y Membrillo, que son suelos cercanos al antiguo cráter principal del Volcán de Antón. Asimismo, la retención de P incrementó con la profundidad a valores entre 33 a 60%. En los suelos de Chiriquí, solo se analizó muestras superficiales (Horizonte A), donde se evidenció una mayor retención de P en promedio, lo cual, de nuevo confirma una influencia o deposición de cenizas volcánicas más reciente. Además, los contenidos de Fe y Al amorfos fueron menores a 1 % y 0.4 %, respectivamente, para las muestras de SRZ. Las muestras de Chiriquí presentaron contenidos mucho mayores de Al amorfo (2.6-4.9 %) y Fe amorfo (0.2-0.7 %).

En los resultados obtenidos hubo diferencias importantes en la retención de P entre las zonas de estudio. Evidentemente, los suelos de Coclé (SRZ) presentaron menores retenciones de P y contenidos de Fe y Al amorfos, posiblemente por la mayor antigüedad de los depósitos de ceniza del antiguo Volcán de Antón, el cual se formó hace unos 56.000 años. Las principales erupciones plinianas freatomagmáticas producidas cuando el magma interactuó con el agua de la caldera-lago hace tan solo 34.600 años generaron flujos piroclásticos que llegaron a la costa del Pacífico, 25 km al S. Las erupciones freáticas han ocurrido desde entonces (la erupción datada más reciente tuvo lugar hace unos 13.000 años), y la actividad puede haber continuado en el Holoceno [17], [18].

En cambio, los suelos de Chiriquí (influencia del Volcán Barú), son suelos con depósitos de ceniza volcánica mucho más recientes geológicamente. Este volcán ha tenido cuatro

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE PROPIEDADES ÁNDICAS PARA PERFILES DOMINANTES DE SUELOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ZARATÍ.

Sitio	Profundidad (cm)	Horizonte	Densidad Aparente (g cm^{-3})	Retención $(PO)_4^{3-}$	Al Amorfo (%)	Fe Amorfo (%)	Al+0.5Fe (%)
El Guabal	0 - 12	Ap	1,31	40,6	1,0	0,2	1,1
	12 - 38	Bt1	1,59	53,2	1,1	0,1	1,1
	38 - 64	Bt2	1,49	52,6	0,8	0,1	0,9
	64 - 83	BCg	1,77	47,6	0,8	0,1	0,9
	83 - 108	Cvg1	1,65	42,5	0,9	0,1	0,9
El Coquillo	0 - 7	Ap	1,31	25,0	0,9	0,1	1,0
	7 - 20	C1	1,59	45,0	0,9	0,2	0,9
	20 - 71	C2	1,49	54,0	1,2	0,2	1,3
	71 - 96	2Ab	1,77	53,4	1,4	0,2	1,5
	96 - 151	2Cr3	1,65	15,7	0,6	0,0	0,6
Cerro Turega	0 - 28	Ap	1,47	33,7	0,7	0,2	0,8
	28 - 37	Ac	1,32	49,0	0,8	0,1	0,8
	37 - 53	C1	1,32	51,6	0,8	0,1	0,8
	53 - 77	C2	1,28	42,6	0,7	0,1	0,8
	77 - 126	C3	1,33	40,1	0,8	0,1	0,8
Sofre	0 -24	Ap	1,53	43,2	0,8	0,2	0,9
	24 - 39	AB	1,34	44,2	0,8	0,2	0,9
	29 - 71	Bw	1,49	53,4	0,6	0,1	0,7
	71 - 117	C1	1,61	60,2	0,8	0,1	0,9
	117 - 185	C2	1,17	58,6	1,8	0,1	1,8
Las Pailas	0 - 15	Ap	1,12	48,9	0,6	0,4	0,8
	15 - 50	C1	nd	54,0	0,7	0,3	0,8
	50 - 78	C2	nd	48,6	0,6	0,3	0,7
	78 - 130	C3	nd	50,2	0,5	0,2	0,7
	130 - 190	Cr	nd	50,5	0,5	0,2	0,6
Membrillo	0 - 23	Ap	1,34	37,4	0,4	0,4	0,6
	23 - 52	Bw/A	1,29	56,6	0,5	0,1	0,5
	52 - 71	C/A	1,53	50,9	0,4	0,1	0,4
	71 - 94	C1	1,67	48,0	0,4	0,1	0,4
	94 - 105	C2	1,31	33,7	0,4	0,1	0,4

episodios eruptivos durante los últimos 1.600 años, incluyendo su erupción más reciente hace aproximadamente de 400 a 500 años [19], por lo que los valores de retención de P y Fe/Al amorfos tienden a ser mayores, especialmente en muestras alejadas del cráter principal. Además, los resultados de Fe amorfo en la SRZ son más altos en el horizonte A, lo que concuerda con otros estudios donde realizaron extracciones selectivas de Fe en un Andisol del oriente antioqueño, Colombia [20], y otro estudio en la región de Ñuble, Chile donde el Fe amorfo presentó valores altos en el horizonte A [21].

En términos de manejo de suelos para uso agropecuario, ambos suelos presentan limitaciones (especialmente en retención P), donde, los suelos de Chiriquí requerirán mayor adición de fósforo en forma de fertilizantes para suplir la demanda del nutriente por los cultivos o pasturas, ya que mucho de lo aplicado como enmienda fertilizante será fijado como fosfatos de Fe y Al. Los suelos de SRZ tienen relativamente menos problema de retención de P, aunque también en un nivel importante para el manejo agronómico. Sin embargo, en la tesis desarrollada en SRZ [2] se demostró otros problemas de tipo físico (altas densidades aparentes, tasas de infiltración bajas y poca retención de agua disponible) y químico (extremadamente bajos contenidos de materia orgánica, pH ácido, contenidos de nutrimentos bajos, etc.)

Por tal motivo, en este estudio se aplicaron técnicas analíticas clásicas en el procesamiento de extractos de suelos, cuya información permite facilitar la caracterización química, facilitar la clasificación de los suelos, mejorar la productividad y las buenas prácticas agrícolas. El método propuesto es relativamente novedoso en el sentido de realizar estos análisis a un menor costo, con menores volúmenes de reactivos químicos, menos desechos analíticos, con viales individuales y leídos en espectrofotómetro Hach, que basa su procedimiento analítico en métodos colorimétricos y espectrofotométricos, en lugar del método más común de evaluación de Fe y Al amorfo con espectrometría de absorción atómica.

CONCLUSIÓN

Los análisis realizados en las muestras de Chiriquí confirman que estos suelos presentan características diagnósticas del orden Andisol, tal como lo establece la taxonomía de Suelos del USDA. Los suelos presentaron densidades aparentes menores a 0.90 g cm^{-3}, retención de fósforo altas (83.18 % de fósforo en forma de PO_4^{3-}) y un contenido de Al+½ Fe (extraídos en oxalato de amonio pH3) igual a 2.0 % o más. Por el contrario, las muestras de suelos de Coclé (Subcuenca del Río Zaratí) mostraron valores menores a los mencionados y no cumplen con las

TABLA 2. CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES ÁNDICAS PARA MUESTRAS DE SUELOS CON INFLUENCIA VOLCÁNICA DE LA PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.

Muestras	Ubicación		Altura	Densidad aparente	PO_4^{3-}	Retención PO_4^{3-}	Al amorfo	Fe amorfo	Al amorfo	Fe amorfo	Al+0.5Fe
	N	*O*		*g cm^{-3}*	*mg L^{-1}*	*%*	*mg L^{-1}*	*mg L^{-1}*	*%*	*%*	*%*
Volcán	8.80968	82.59297	1473	1.21	12.00	16.78	0.104	0.304	1,0	0,2	1,1
Barú 2	8.80678	82.59254	1450	0.78	8.18	43.27	0.427	0.815	4,3	0,4	4,5
Sta. Lucia	8.76271	82.44310	1221	0.75	3.32	76.98	0.494	0.714	4,9	0,4	5,1
Barú, PN	8.79694	82.48952	1815	0.62	4.78	66.85	0.104	1.355	4,2	0,7	4,5
Boquete 2	8.80684	82.59263	1630	0.76	8.50	41.05	0.420	0.907	4,2	0,5	4,4
Volcán 2	8.76023	82.63299	1408	0.57	2.43	83.18	0.361	1.208	7.2	0,6	7.5
El Salto	8.79371	82.47880	1634	0.81	7.17	50.31	0.344	1.145	3,4	0,6	3,7
Los Naranjos	8.79232	82.45609	1400	0.52	4.56	68.38	0.307	0.740	3,1	0,4	3,3
Boquete 1	8.78714	82.47813	1590	0.77	8.30	42.48	0.298	1.005	3,0	0,5	3,2
Sta. Lucia 2	8.77617	82.45934	1437	0.69	4.15	71.22	0.259	0.754	2,6	0,4	2,8

características diagnósticas del orden Andisol, quizá debido a la meteorización de los materiales parentales depositados por actividad volcánica más antigua.

Finalmente, el análisis de estas muestras de suelos, dan una visión general de las propiedades ándicas existentes en ambas áreas de estudio y permiten generar recomendaciones de manejo de la fertilidad de los suelos, mejorar las prácticas agrícolas sostenibles, o evaluar el uso potencial del suelo según su capacidad agroproductiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Panamá (SENACYT), por los recursos otorgados para la realización de este estudio (Proyecto FID17-084). Se agradece especialmente el apoyo en trabajo de campo al Centro Regional de Chiriquí de la Universidad Tecnológica de Panamá. Un agradecimiento especial a los estudiantes Digna González y Carlos Santana, por su apoyo en trabajo de campo y análisis de propiedades físicas. Se agradece especialmente al Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ing. Civil (Lic. Yarisel González) y el laboratorio del campus Tocumen del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (Lic. Kleever Espino), por su apoyo en la realización de los análisis químicos.

REFERENCIAS

[1] Autoridad Nacional del Ambiente, "Atlas de las tierras secas y degradas de Panamá." https://edo.jrc.ec.europa.eu/gisdata/scado/land_degradation/pa/ATLAS_DESERTIFICACION.pdf (accessed Jun. 23, 2022).

[2] D. R. González González and C. A. Santana Castillo, "Clasificación pedológica en la subcuenca del río Zaratí para el desarrollo de buenas prácticas de conservación de los suelos ," Universidad Tecnológica de Panamá , Panamá , 2021.

[3] Y. Díaz, F. Espinoza, and J. Gil, "Efecto de la fertilización con fósforo en la relación suelo-planta-animal en suelos ácidos del estado Cojedes, Venezuela," *Zootec Trop*, vol. 22, no. 4, Nov. 2004.

[4] R. von Wandruszka, "Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility," *Geochem Trans*, vol. 7, 2006, doi: https://doi.org/10.1186/1467-4866-7-6.

[5] N. H. Batjes, "Global distribution of soil phosphorus retention potential," Wageningen, 2011. Accessed: Jun. 25, 2022. [Online]. Available: https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/185289

[6] R. Devnita, B. Joy, M. Arifin, A. Setiawan, S. Rosniawaty, and F. S. Meidina, "The phosphorus status of andisols as influenced by nanoparticles of volcanic ash and rock phosphate," *AIP Conference Proceedings 1927*, Feb. 2018, doi: 030035.

[7] E. Bojórquez-Quintal, C. Escalante-Magaña, I. Echevarría-Machado, and M. Martínez-Estévez, "Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils," *Front Plant Sci*, vol. 8, p. 1767, Oct. 2017, doi: 10.3389/FPLS.2017.01767/BIBTEX.

[8] M. T. Fernández, "Fósforo: amigo o enemigo," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XLI, pp. 51–57, 2007, Accessed: Jun. 25, 2022. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009

[9] E. Camacho-Díaz, J. Ruiz-Careaga, M. Deyta-Sánchez, Y. Deyta-Sánchez, and M. García-Gamboa, "Contenido y distribución de las formas de hierro en algunos suelos de la sierra norte de Puebla, México.," *Terra Latinoamericana*, vol. 23, pp. 175–181, 2005, Accessed: Jun. 25, 2022. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/pdf/573/57323204.pdf

[10] P. R. Fernández-Ojeda, D. C. Acevedo, A. Villanueva-Morales, and Miguel Uribe-Gómez, "Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo," *Rev Mex Cienc For*, vol. 7, no. 35, pp. 65–77, Apr. 2016, Accessed: Jun. 25, 2022. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n35/2007-1132-remcf-7-35-00065.pdf

[11] M. Pansu and J. Gautheyrou, *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*. 2006.

[12] Hach Company, “TNT 844 Phosphorus, Reactive (Orthophosphate) and Total.” 2019.
[13] Hach Company, “Aluminum, Chromazurol S TNTplus Method (0.50 mg/L).” Mar. 2019.
[14] Hach Company, “Iron, Phenanthroline TNTplus Method (6.0 mg/L).” 2017.
[15] E. Yunita, D. Yulianto, S. Fatimah, and T. Firanita, “Validation of UV-Vis Spectrophotometric Method of Quercetin in Ethanol Extract of Tamarind Leaf,” *Fundamental and Applied Pharmaceutical Science*, 2020.
[16] C. R. Sabido Couoh, A. F. Castellanos Ruelas, J. G. Rosado Rubio, L. A. Chel Guerrero, P. O. M. Acereto Escoffié, and D. A. Betanour Ancona, “Adaptación de un micrométodo espectrofotométrico para determinación de fósforo en hueso,” *Rev Latinoam Quim*, vol. 38, no. 2, Aug. 2010.
[17] Smithsonian Institution, “Global Volcanism Program | El Valle,” 2013. https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=346030 (accessed Jul. 15, 2022).
[18] “El Valle Volcano, Panamá - facts & information | VolcanoDiscovery,” Jul. 17, 2022. https://www.volcanodiscovery.com/es/el_valle.html (accessed Jul. 15, 2022).
[19] D. R. Sherrod, J. W. Vallance, A. T. Espinosa, and J. P. Mcgeehin, “Volcán Barú-Eruptive History and Volcano-Hazards Assessment Volcán Barú-Eruptive History and Volcano-Hazards Assessment Open-File Report 2007-1401,” *Science for a changing world*, pp. 1–33, 2008, Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: http://pubs.usgs.gov/of/2007/1401
[20] N. Pérez Echevarría, D. Jaramillo, O. Ruiz Villadiego, and L. Parra Sánchez, “Extracciones selectivas y secuenciales de Al, Fe y Si en un Andisol del oriente Antioqueño, Colombia ,” *Revista de la Facultad de Ciencias*, vol. 7, no. 1, 2018, Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/115/115589010/html/
[21] C. Guajardo *et al.*, “Anthropogenic alteration of available, amorphous, and total iron in an Andisol from dairy slurry applications over a 12-year period,” *Chil J Agric Res*, vol. 80, no. 1, pp. 108–117, Jan. 2020, doi: 10.4067/S0718-58392020000100108.

Use of Biochar to improve biomethanization in anaerobic co-digestion

Uso de Biocarbón para el mejoramiento de biometanización en codigestión anaeróbica

Luis Mendoza
Universidad Tecnológica de Panamá,Facultad de Ingeniería Civil Grupo Biosólidos: Energía y Sostenibilidad
Panamá, Ciudad de Panamá
luis.mendoza@utp.ac.pa

Yeraldin González
Universidad Tecnológica de Panamá,Facultad de Ingeniería Civil Grupo Biosólidos: Energía y Sostenibilidad
Panamá, Ciudad de Panamá
yeraldin.gonzalez@utp.ac.pa

Erick Ortiz
Universidad Tecnológica de Panamá,Facultad de Ingeniería Civil Grupo Biosólidos: Energía y Sostenibilidad
Panamá, Ciudad de Panamá
erick.ortiz@utp.ac.pa

Marian Ramírez
Grupo Biosólidos: Energía y Sostenibilidad
Panamá, Ciudad de Panamá
marian.ramirez@utp.ac.pa

Euclides Deago
Universidad Tecnológica de Panamá,Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) Sistema Nacional de Investigación(SNI)
Panamá, Ciudad de Panamá
euclides.deago@utp.ac.pa

Arthur James
Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica Sistema Nacional de Investigación(SNI)
Panamá, Ciudad de Panamá
arthur.james@utp.ac.pa

Abstract— **Biosolids are a byproduct of wastewater treatment that is used for biogas production. In Panama, biosolids remain untapped as a sustainable source of energy; but they are disposed in landfills, which could become an environmental trigger. In this sense, the anaerobic co-digestion of biosolids generated in the Juan Díaz Wastewater Treatment Plant was evaluated at the batch reactor level, with the addition of biochar from rice husks, which was obtained by gasification. This work presents the methodological criteria used and the satisfactory findings obtained from the investigation. The results obtained from the anaerobic co-digestion using biochar, had an increase of 21% with respect to the test without biochar. The methane content of the trial with biochar (55.88%) was also higher compared to the trial without biochar (53.46%). Another finding was the regulation of alkalinity provided by the biochar, which allowed maintaining the pH in favorable ranges for co-digestion. These findings show the potential of biochar to generate high biological stability in anaerobic co-digestion and therefore an improvement in biogas production. However, it is necessary to continue researching on the use of biochar, to optimize anaerobic co-digestion processes.**

Keywords— Biosolids, Biochar, Anaerobic Codigestion, Biochemical Potential of Methane.

Resumen — Los biosólidos son un subproducto del tratamiento de las aguas residuales que sea aprovechan para la producción de biogás. En Panamá, los biosólidos siguen sin aprovecharse como una fuente sostenible de energía; sino que se disponen en los rellenos sanitarios, lo cual podría convertirse en un detonante ambiental. En este sentido, se evaluó a nivel de reactores batch la codigestión anaeróbica de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Juan Díaz, con la adición de biocarbón de cascarilla de arroz, que se obtuvo por gasificación. Este trabajo plantea los criterios metodológicos usados y los hallazgos satisfactorios obtenidos de la investigación. Los resultados obtenidos de la codigestión anaeróbica usando biocarbón, tuvo un incremento de 21% con respecto al ensayo sin biocarbón. El contenido de metano del ensayo con biocarbón (55.88 %), también resultó mayor en comparación con el ensayo sin biocarbón (53.46%). Otro hallazgo fue la regulación de alcalinidad aportado por el biocarbón, lo cual permitió mantener el pH en rangos favorables para la codigestión. Estos hallazgos muestran el potencial del biocarbón para generar una alta estabilidad biológica en la codigestión anaeróbica y por ende un mejoramiento en la producción de biogás. Sin embargo, es necesario continuar las investigaciones en el uso de biocarbón, para optimizar los procesos de codigestión anaeróbica.

Palabras claves — Biosólidos, Biocarbón, Codigestión Anaeróbica, Potencial Bioquímico del Metano.

I. Introducción

En Panamá los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR), producen una gran cantidad de biosólidos (lodos orgánicos). Estos son subproductos, ya estabilizados que contienen grandes cantidades de materia orgánica, microorganismos y metales pesados [1]. Se tiene conocimiento que el relleno sanitario de Cerro Patacón recibió 24,013 toneladas de biosólidos para el año 2017, lo que significó un aumento del 9.2% con respecto al año 2016. Gran parte de estos biosólidos provienen de laPlanta de Tratamiento de Aguas Residuales Juan Díaz (PTAR) Panamá, la cual ha dispuesto en promedio 70 toneladas por día desde el año 2018 [2].

La PTAR de Juan Diaz cuenta con una línea de tratamiento de biosólidos mediante la digestión anaerobia con la generación de biogás, el cual es usado en la cogeneración eléctrica. Posteriormente, estos biosólidos son deshidratados y estabilizados, para luego disponerse en el relleno sanitario de Cerro Patacón[1]. Esto significa que en la actualidad los biosólidos que diariamente genera la PTAR de Juan Díaz no se aprovechan [2].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00093

Este escenario ha generado el interés de potenciar el aprovechamiento de los biosólidos por medio de la codigestión anaeróbica usando residuos orgánicos. En este sentido, el grupo de investigación Biosólidos: Energía y Sostenibilidad ha avanzado en esta materia, buscando potenciar este biosólidos, que es un recurso que se genera de forma sostenible. Se han investigado a nivel de reactores batch el potencial bioquímico del metano (PBM) generado, con resultados alentadores[3-5].

A nivel de codigestión aneróbica igualmente se ha avanzado en estudios para potenciar la producción debiogás. En este sentido, se han investigado la aplicación de biocarbón de diferentes fuentes naturales (cascarillas de arroz, trigo, etc)[6, 7]. Estos materiales que se transforman a biocarbón se sometieron a diferentes procesos para su obtención, ya sea por pirólisis o gasificación [8]. Se ha reportado que la aplicación del biocarbón durante la digestión anaeróbica son muy pocos comunes; sin embargo, señalan que su aplicación podría ser beneficiosa para potenciar la producción de biogás [9]. En este sentido, otros autores afirman que usar biocarbón durante la digestión anaeróbica sería rentable, debido a que estimula las actividades microbianas, mejora significativamente la capacidad de producción y a su vez mejora la capacidad de amortiguamiento en el proceso [10]. De igual forma, Mumme et al [8] menciona que agregar biocarbón a base de cascarilla de arroz a reactores de digestión anaeróbica, mejora la capacidad de estabilización en el proceso, así como la producción de metano.

Diversos estudios han demostrado que el uso de biocarbón obtenido por medio de carbonización (550°C - 100°C) incrementa la producción de metano, para diversas materias orgánicas como algas, fracción orgánica de residuos urbanos, biosólidos, estiércol de ganado y aves [6, 11]. Específicamente, con biocarbón de cascarilla de arroz, estudios registraron incrementos en la producción de metano del 28.9 %[12] y 25% [7].

El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la dosificación de biocarbón a base de cascarilla de arroz (obtenido por gasificación) en ensayos batch de codigestión anaeróbica, para mejorar la biometanización, específicamente en la producción de metano y en la estabilización de pH.

II. Metodología

A. Muestreo de Biosólidos y Residuos Orgánicos

Los Biosólidos usado se obtuvieron de la PTAR de Juan Díaz, siguiendo lineamientos del Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 47-2000 [13]. Se usaron dos tipos de biosólidos: digeridos (inóculo) y espesados (Co-sustrato). Para residuos orgánicos, se realizó una muestra simulada con porcentajes correspondientes a 40% de frutas, 20% de tubérculos y 40% de legumbres [14].

B. Muestreo y Carbonización de Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz fue obtenida en la empresa Molino Doferra, ubicada en la 24 de Diciembre, Panamá.

Luego, la cascarilla de arroz fue carbonizada en un reactor gasificador de flujo ascendente top-lit (TLUD por sus siglas en inglés). Se utilizó la metodología propuesta por James et al, [15] y Bethancourt et al [16], para generar el biocarbón de cascarilla de arroz utilizando un flujo de aire de 20 L/min. En el proceso, se usaron tres termopares tipo K para medir la temperatura de reacción y estas fueron registradas por medio de un sistema de adquisición de datos (HOBO, USA). Para la experimentación se usó un compresor de aire de 6 galones (Brigg & Stratton, USA) para suministrar el flujo de aire requerido. Montaje Experimental del Reactor Batch

Para obtener el Potencial Bioquímico de Metano (PBM), se usó el método manométrico mediante el Sistema Oxitop®. Este método se fundamenta en el registro de deltas de presiones que se producen por la digestión anaeróbica de la biomasa añadida al reactor [17]. Dichos deltas de presión se registran en Los cabezales digitales colocados en cada reactor envían los datos a la interfase por medio de infrarrojo. A su vez, el Sistema Oxitop ® cuenta con una base magnética la cual agita el contenido de las botellas durante todo el periodo de digestión. Los reactores usados cuentan con se cuentan con salidas septum donde se colocaron perlas de Hidróxido de Sodio (NaOH), para captura del CO_2 generado en la digestión [18].

Estos reactores batch fueron botellas de 250 mL de capacidad. En este estudio se usó un volumen útil de 40% (100 mL). En dicho volumen útil se aplicó la relación Inóculo/Sustrato (RIS) 2:1. El volumen de inóculo y sustrato se determinó en base a la cantidad de solidos volátiles (SV) presentes en cada tipo de material [19]. Los datos de concentración de SV de cada material; fueron usados en la ecuación 1, para cuantificar la relación de biosólidos digeridos (Inóculo) y espesados, así como Residuos Orgánicos (Sustrato) a utilizar en el ensayo.

$$V_s = \frac{(V)(I_{SV})}{(ISR)(S_{SV})+I_{SV}} \quad (1)$$

En tanto, para el volumen de inóculo se obtienen de la diferencia del volumen útil menos el volumen de sustrato (ecuación 2):

$$V_I = V - V_S \quad (2)$$

Donde: V_I: volumen de inóculo (L); V: volumen útil de reactor (L); V_S: volumen de sustrato (L); ISR: relación inoculo sustrato; I_{SV}: concentración de SV de inóculo (g/L); S_{SV}: concentración de SV del sustrato (L).

Para este estudio de codigestión anaeróbica se realizaron dos montajes por triplicado. El primer montaje fue realizado sin biocarbón, donde el pH se controló dosificando ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, los cuales han sido reportado en la literatura como buffers comúnmente utilizados [20], [21]; en tanto, para el segundo ensayos se empleó biocarbón de cascarilla de arroz [7], el cual se dosificaba a una razón de 1.0 gr al inicio del ensayo y posteriormente a 0.5 gr según iba variando el pH.

La duración del ensayo fue de 16 días. Estos reactores se mantenían agitados a 120 RPM de forma continua. Además, cada día se realizada agitación manual para mantener homogeneidad en el microambiente de los ensayos batch. Ambos ensayos, con y sin biocarbón, se realizaron a una temperatura promedio de 35°C.

C. Caracterización fisicoquímica

A las muestras de Biosólidos obtenidas de la PTAR de Juan Díaz, se le realizó los análisis fisicoquímicos para determinar pH, sólidos volátiles y alcalinidad. Estos parámetros se realizaron según el Standard Methods [22], en el Laboratorio de Sistemas Ambientales del Centro de

Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá.

El biocarbón empleado se analizó en el Laboratorio de Fertilidad de Suelo del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). En este laboratorio se realizaron análisis de pH, carbón orgánico (C.O.), nitrógeno (N), óxido de fósforo (P_2O_5), óxido de potasio (K_2O), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), materia orgánica (M.O), manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu). La materia orgánica fue obtenida por medio de un espectrofotómetro de luz uv-visible (ThermoScientific, USA), utilizando el método de digestión húmeda de Walkley Black. Mientras que el K_2O, Mn, Fe, Cu y Zn fueron obtenidos utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua marca Analytik Jena (AA300, Alemania) [15].

D. Determinación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Una vez finalizado el montaje se obtuvieron los diferenciales de presiones con el Sistema Oxitop, las cuales se usaron para determinar el potencial bioquímico de metano, usando una serie de ecuaciones que considera el uso de sistemas manométricos [23], [24] y [25].

E. Determinación de la composición de Biogás

Una vez concluidos los ensayos se usó el analizador para biogás Gasboard 3200 plus®, con el cual fue posible determinar la composición del biogás: metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico [26]. Para ello se emplearon bolsas de polipropileno llamadas Tedlar Bag (Sigma-Aldrich) de 1 L de volumen (Figura 1). Los resultados del analizador se obtuvieron en porcentajes de CH_4, CO_2, y H_2S. Se llevó a cabo la lectura hasta que el valor de metano en cada reactor obtuvo su máximo alcanzado.

Figura 1. Ensayos Batch con bolsas Tedlar para captura de biogás.

III. Resultados y Discusión

A. Caracterización físico-química de biosólidos y bicarbón

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del biosólido digerido, espesado y cascarilla de arroz carbonizada; se detallan en la Tabla I:

TABLA I. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE INÓCULO, SUSTRATO Y CO- SUSTRATO.

Parámetros	**Inóculo - Biosólido Digerido**
pH	7.30
Sólidos Volatiles (g/L)	38.75
Alcalinidad (mg/L)	3,030
	Co – Sustrato - Biosólido Espesado
pH	6.50
Sólidos Volatiles (g/L)	53.00
Alcalinidad (mg/L)	7,430
	Co- Sustrato – Residuos Orgánicos
pH	5.02
Sólidos Volatiles (g/L)	37.55
	Sustrato – Cascarilla de Arroz
pH	9.90
Carbón Orgánico (%)	2.40
N (%)	0.50
P_2O_5 (%)	0.80
K_2O (%)	0.90
CaO (%)	0.20
MgO (%)	0.20
M.O (%)	4.10
Mn (mg/L)	482
Fe (mg/L)	5640
Zn (mg/L)	958
Cu (mg/L)	15
Humedad (%)	76

Todos los resultados de la caracterización de biosólidos espesados y digerido, muestran valores dentro de lo rangos aceptables [27].

B. Variación de pH con biocarbón añadido biocarbón

Con respecto al control de pH se observó que la dosificación de biocarbón ayudó a mantener la codigestión en rangos entre 6.39 y 7.07 una vez ajustados al inicio del ensayo a condiciones estables. Posteriormente, no se hizo dosificación de biocarbón. (Tabla II).

TABLA II. RESULTADOS DE PH PARA CODIGESTIÓN CON BIOCARBON.

REACTORES	**BIOCARBÓN**	**INICIO: 06/05/2022**	
Relación 2:1 a 35°C	**Gramos (g) añadidos**	**pH inicial**	**pH Ajustado**
Reactor 1	1.00	6.93	7.07
Reactor 2	0.50	6.29	6.80
Reactor 3	0.50	6.21	6.39
		CONTROL: 16/05/2022	
		pH inicial	**pH Ajustado**
Reactor 1	0.00	8.47	-
Reactor 2	0.00	8.34	-
Reactor 3	0.00	8.99	-
		FINAL: 20/05/2022	
		pH final	
Reactor 1	0.00	8.59	
Reactor 2	0.00	8.45	
Reactor 3	0.00	9.24	

En el ensayo realizado sin biocarbón los ajustes se realizaron con la dosificación de NaOH y HCL, para

mantenerlos en rangos de operación permisible de pH (Tabla III).

TABLA III. RESULTADOS DE PH PARA CODIGESTIÓN DE LO + ROM SIN BUFFER.

REACTORES	HCL^-	INICIO: 06/05/2022	
Relación 2:1	Volumen (mL) añadidos	pH inicial	pH Ajustado
Reactor 1	0.00	6.81	-
Reactor 2	0.00	7.05	-
Reactor 3	0.00	7.07	-
		CONTROL: 16/05/2022	
		pH inicial	pH Ajustado
Reactor 1	0.40	8.29	7.89
Reactor 2	1.00	8.51	7.77
Reactor 3	-	7.52	-
		FINAL: 20/05/2022	
		pH final	
Reactor 1	0.00	8.47	
Reactor 2	0.00	8.51	
Reactor 3	0.00	6.63	

Los valores de pH resultado en los reactores con biocarbón dosificado, mostraron una capacidad de amortiguamiento que permitió que los reactores mantuvieran el pH dentro del rango óptimo mostrado en literatura, para una eficiente digestión y que va desde 6.5 a 8.5 unidades [28].

Son diversos los buffers utilizados durante años en los ensayos de digestión anaeróbica; soluciones de $CaCO_3$, HCL^-, NaOH, $NaHCO_3$; donde no solo tienen un costo elevado, sino que impactan negativamente los microorganismos[29]. En este sentido, el biocarbón ha demostrado tener propiedades alcalinas debido a la presencia de sales y metales alcalinos , que lo hace un económico y excelente amortiguador del pH [11].

C. *Potencial Bioquímico de Metano resultante*

Los resultados obtenidos del PBM reflejan una marcada variación entre el ensayo con dosificación de biocarbón y los reactores donde no se usó (Figura 2).

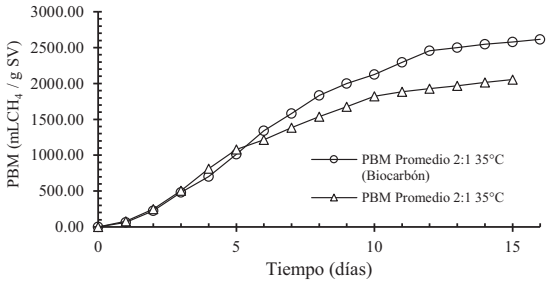


Figura 2. Resultados de PBM en Reactores con Relación 2:1.

Se puede observar un incremento en los valores de PBM en el ensayo con biocarbón a partir del día 6 y a partir del día 13 se refleja una tendencia hacia la estabilización de la producción de metanos. En tanto, en el ensayo sin biocarbón el crecimiento de la producción de metano es menor y la estabilización de la curva inicia al día 10. La prematura estabilización en el ensayo sin biocarbón se asocia a la baja capacidad de amortiguamiento del pH durante los días 4 a 6, donde se da el proceso de acidogénesis y ocurre una disminución del pH en el sustrato de forma natural. Ma et al [16], demostró que durante el proceso de acidogénesis con la adición de biocarbón, hubo una reducción en la disminución, proporcionando mejor amortiguamiento de pH, al mantener un pH más elevado. El biocarbón permitió un crecimiento constante del día 6 al 12, donde podemos inferir; que el biochar no solo subió el pH en el momento de ser añadido, sino que ayudo de manera progresiva el ensayo, permitiendo un mejor desempeño de los microorganismos en la producción de metano.

Se obtuvo un incremento del 21% con la adición de biocarbón al ensayo durante un periodo de 16 días. Estos resultados se asocian a la composición orgánica de dicho biocrbón, el cual aporta carbono orgánico y otros elementos esenciales para la actividad metabólica de los microoeganismos (Tabla I). Cabe mencionar que, en estudios similares muestran que al agregar biocarbón ocurrieron incrementos en la producción metano usando biocarbón a base de cascarilla de arroz y estiércol de ganado, donde tuvieron valores de 28.9 % [30]; como también, 31% de incremento con añadir 0.6 g de biocarbón en un periodo de 30 días continuos [12].

D. *Composición de biogás generado*

Los resultados de la composición de biogás obtenidos de los ensayos batch de codigestión muestran que la producción de metano fue mayor en el ensayo con biocarbón y por el otro lado lo valores de CO_2 y H_2S fueron menores (Tabla IV).

TABLA IV. COMPOSICIÓN DE GASES PRODUCIDOS EN ENSAYO DE CODIGESTIÓN ANAEROBICA CON Y SIN BIOCARBÓN

Ensayo	CH_4 (%)	CO_2(%)	H_2S (ppm)
Con Biocarbón	55.88	1.06	4
Sin Biocarbón	53.46	1.35	7

Los resultados promedios de metano del ensayo con biocarbón (55.88 %) indica que hubo un mejor rendimiento con respecto al ensayo sin biocarbón (53.46%). Estos resultados permiten inferir que la dosificación de biocarbón favorece la biometanización. Estos resultados son concordantes con los obtenidos por Mumme et al [8], quien usó biocarbón generado por medio pirolisis, obteniendo una composición de metano de 53.3%.

En tanto, los bajos valores de CO_2 detectado por el analizador de biogás en ambos ensayos (Tabla IV), demuestra que la captura del CO_2, por medio de trampas de hidróxidos, fue efectiva en el Sistema Oxitop. Estos resultados igualmente permiten inferir, que al tener una estructura porosa como el biocarbón, se promueve la absorción de CO_2. También, ocurren reacciones químicas entre el CO_2 producido y los cationes derivados del biocarbón, así formando carbonatos, que son una manera de remover el dióxido de carbono[11].

El otro gas de cuidado de la codigestión anaeróbica es el H_2S, el cual es conocida sus propiedades que inhiben la actividad microbiana [11]. En este sentido, se ha reportado que el uso de biocarbón en la codigestión anaeróbica logró una purificación de H_2S del 98%, dado que es un material reactivo [8]. En nuestro estudio se observó la disminución de este H_2S, en comparación con los reactores a los cuales no se añadió biocarbón (Tabla 4), lo cual está acorde con los reportes de la literatura.

IV. CONCLUSIONES

La codigestión anaeróbica de biosólidos y residuos orgánicos con biocarbón añadido obtuvo un mejor desempeño a lo largo del ensayo, mostrando mayor estabilidad en los procesos de acidogénesis al tener un estable amortiguamiento del pH.

El biocarbón añadido a la codigestión, ayudó a un incremento del 21% de la producción de metano, en comparación con el ensayo sin biocarbón, lo que nos permite inferir que el biocarbón brinda a la codigestión estabilidad química y potencia la reducción de la composición de CO_2 y H_2S, lo que permite un biogás más limpio y seguro para plantas de biogás que lo añadan a sus procesos.

Si bien es cierto que los resultados son alentadores, es necesario continuar evaluando diferentes variantes de operación de los reactores, que permitan una mayor certeza en el uso efectivo del biocarbón en la codigestión anaeróbica.

V. AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Tecnológica de Panamá y al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, por brindar las instalaciones para el desarrollo de esta investigación. Al grupo de investigación Biosólidos: Energía y Sostenibilidad, por brindar toda la información necesaria en esta línea de investigación y así aportar al desarrollo de este artículo. A la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento del proyecto IDDSE19-008 “Codigestión anaeróbica de biosólidos de aguas residuales y desechos orgánicos municipales como alternativa energética sostenible”, siendo este artículo un producto de este proyecto. Así mismo agradecer al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la SENACYT.

VI. REFERENCIAS

[1] E. Garrido (2018, Abril 01) Relleno del Cerro Patacón, área destinada para los residuos de la planta de tratamiento de Juan Díazz. *El Capital Financiero*. Available: https://elcapitalfinanciero.com/relleno-del-cerro-patacon-area-destinada-para-los-residuos-de-la-planta-de-tratamiento-de-juan-diaz/

[2] G. Sánchez, J. Ramírez, A. James, E. Deago, and J. Villarreal, "Evaluación del potencial de lodos orgánicos carbonizados de una planta de tratamiento de aguas residuales para el mejoramiento de suelos," *APANAC*. [Online]. Available: https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3198

[3] M. Ramírez , E. Deago , and N. Tejedor, "Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás," *Revista I+D Tecnológico,* 2020.

[4] A. J. a. D. E. Chen A, "Digestividad anaeróbica en reactores batch de lodos orgánicos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Juan Diaz " in *APANAC* 29 de Junio de 2021 2020. [Online]. Available: https://codigestion.utp.ac.pa/wp-content/uploads/2021/09/Articulo-APANAC-2021-Chen-y-Arias.pdf. [Online]. Available: https://codigestion.utp.ac.pa/wp-content/uploads/2021/09/Articulo-APANAC-2021-Chen-y-Arias.pdf.

[5] D. E. y. R. M, "Lodos Digeridos y su Potencial Energético Aprovechable " in *IX SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA DE RESIDUOS*, PANAMÁ, 20 al 24 de semptiembre de 2021 2021.

[6] D. Y. F. Qiu L., Wang F., Davaritouchaee M. and Yao Y.Q. , "A review on biochar - mediated anerobic digestion with enhanced methane recovery " *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 115, 2019.

[7] H. Y. Ma H, Kobayashi T and Qin Xu K, "The role of rice husk biochar addition in anaerobic digestion for sweet sorghum under high loading condition," *Biotechnology Reports,* 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00515.

[8] J. Mumme, F. Srocke, K. Heeg, and M. Werner, "Use of biochars in anaerobic digestion," *Bioresource Technology,* vol. 164, pp. 189-197, Jul 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.05.008.

[9] C. Luo, F. Lü, L. Shao, and P. He, "Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes," *Water Research,* pp. 68, 710-718, 2015.

[10] H. M. Jang, Y. K. Choi, and E. S. Kan, "Effects of dairy manure-derived biochar on psychrophilic, mesophilic and thermophilic anaerobic digestions of dairy manure," *Bioresource Technology,* vol. 250, pp. 927-931, Feb 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.11.074.

[11] L. Y. Wang G, Sheng L,Xing Y,Liu G, Yao G, Hao Ngo H, Li Q, Wang XiaoChang, Li Yu and Chen R., "A review on facilitating bio-wastes degradation and energy recovery efficiencies in anaerobic digestion systems with biochar amendment," *Biocource Technology,* vol. 314, 123777, 2020.

[12] P. T. R. a. L. E. A. Inthapanya S, "Biochar increases biogas production in a batch digester charged with cattle manure," *Livestock Research for rural Development* vol. 24, 212, 29 julio 2022 2012. [Online]. Available: http://www.lrrd.org/lrrd24/12/sang24212.html.

[13] "DGNTI-COPANIT 47-2000.AGUA. USOS Y DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS," ed. Panamá, 2000.

[14] P. N. Luque L, "ESTUDIO DE CODIGESTIÓN ANAE´RBICA DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES Y LODOS DIGERIDOS EN REACTORES BATCH PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS," Universidad Tecnologica de Panamá 2022.

[15] A. J. G. Bethancourt, J. E. Villarreal and N. Marin-Calvo, "Biomass carbonization - production and characterization of biochar from rice husks," presented at the 7th International Engineering Sciences and Technology Conference IESTEC 2019, 2019.

[16] W. Y. a. M. D. B. R.A.M James, "The effect of biomass physical properties on top-lit updraft

gasification of woodchips," *Energies* vol. 9, 4, p. 283, 2016.
[17] WTW, 2000.
[18] T. F. Souto, S. F. Aquino, S. Q. Silva, and C. A. L. Chernicharo, "Influence of incubation conditions on the specific methanogenic activity test," *Biodegradation,* vol. 21, no. 3, pp. 411-424, Jun 2010, doi: 10.1007/s10532-009-9311-x.
[19] H. Ракић, V. Šušteršič, D. Gordic, M. Josijevic, N. Jurišević, and J. Nikolic, *Inoculum to substrate ratio - Calculating methods*. 2020.
[20] S. Xie, P. G. Lawlor, J. P. Frost, Z. Hu, and X. Zhan, "Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage," (in English), *Bioresource Technology,* Article vol. 102, no. 10, pp. 5728-5733, May 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.03.009.
[21] W. Q. Zhang *et al.*, "Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions," (in English), *Applied Energy,* Article vol. 128, pp. 175-183, Sep 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.071.
[22] APHA, *Standard methods for examination of water and wastewater. 22nd Ed*. Washington D.C., 2012.
[23] V. Ortiz Jordá, "Puesta a punto de una metodología para la determinació de la actividad metanogénica específica (AME) de un fango anaerobio mediante el Sistema Oxitop.Influencia de las Principales Variables Experimentales.," *[Tesis de Maestría],* 2011.
[24] B. A. Parra Orobio *Producción de Metano a partir de la digestión anaerobia de bioresiduos de origen municipal (Tesis de Maestría)*. 2014.
[25] J. B. Gimenez, N. Marti, J. Ferrer, and A. Seco, "Methane recovery efficiency in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater: Evaluation of methane losses with the effluent," *Bioresource Technology,* vol. 118, pp. 67-72, Aug 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.05.019.
[26] C. Ruiyi, "Gas analizer Gasboard Plus 3200," China 2017.
[27] E. Deago , M. Ramírez, and E. Vallester, "Evaluación de biosólidos de aguas residuales para producción de biogás: alternativa sostenible del manejo de rellenos sanitarios en Panamá," in *VIII Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, Asunción 2019.
[28] C. Holliger *et al.*, "Towards a standardization of biomethane potential tests " *Water Science & Technology* pp. 2515-2522, 2016.
[29] B. C. a. D. M, "Anaerobic digestion for the stabilization of the organic fraction of municipal solid waste: A review," *NRC Research Press,* 2016, doi: dx.doi.org/10.1139/er-2015-0077.
[30] D. A. L. R. B. Fidel, M. L. Thompson and M Lawrinenko, "Characterization and quantification of biochar alkalinity " *Chemosphere,* vol. 167, pp. 367-373, 2017.

Long-term monitoring of moisture changes in sedimentary soil of the Panama through non-invasive time-lapse ERT methodology

Monitoreo a largo plazo de los cambios de humedad en suelos sedimentarios de Panamá a través de la metodología no invasiva de lapso temporal de TRE

Alexis Mojica
LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigación, SENACYT
Panamá
https://orcid.org/0000-0002-9069-7336

Anibal Fossatti
Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica CITT, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
https://orcid.org/0000-0003-4284-3500

Pablo Montero
Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica CITT, Universidad Tecnológica de Panamá
Panama
https://orcid.org/0000-0002-1471-2741

Leomar Acosta
Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
leomar.acosta@gmail.com

Margie Gómez
LABEST, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
margie.gomez@utp.ac.pa

Carlos A. Ho
LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
carlos.ho@utp.ac.pa

Cristóbal Condori
Departamento Académico de Geología y Geofisica de la Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa
Perú
https://orcid.org/0000-0003-2657-147X

Ramsés Buenaño
Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
ramses.buenano@utp.ac.pa

Rosalín Méndez
LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
rosalin.mendez@utp.ac.pa

Osiris Cubilla
3P Soc. Ltda.
Panamá
osiris.cubilla.1986@gmail.com

Eduardo Silva
3P Soc. Ltda.
Panamá
silvasan@cwpanama.net

***Abstract*— The aim of this work was study the effects of climate and vegetation on the moisture content present in soils that support a complex vegetation system which comprises a pasture and micro-forest area, at the Center for Innovation and Technology Transfer of the Technological University of Panama located in Aguadulce, Coclé. For such purposes, a geophysical monitoring was carried out through four electrical resistivity tomographies on a 23.5 m long profile developed in the rainy season from July 9 to October 29, 2019 with time lapses of 38, 34 and 39 days between them. The datasets were inverted using a time-lapse ERT code based on the Boundless Electrical Resistivity Tomography (BERT). With the results obtained in this work (electric resistivity tomographies), was possible to delimit the electrical anomalies related to the physical characteristics of the subsoil in both: the pasture and the micro-forest area. Geophysical monitoring and volumetric moisture content calculated via Archie's law, allowed quantifying the dynamics of moisture content in both areas with significant percentage differences between -50% and 100% over the micro-forest area. This leads us to evaluate the levels of moisture absorption in both areas and consider the problem of land use and the impact it has on the groundwater recharge processes in this important region of the country.**

Keywords*— *volumetric moisture content, time-lapse ERT, Aguadulce, pasture zone, micro-forest

I. Introducción

Las transformaciones que experimentarán los ecosistemas y la fisiología de las plantas en un futuro no muy lejano, serán el resultado de las alteraciones que en la actualidad presentan los patrones de temperatura y precipitación debido al cambio climático; es importante agregar el impacto negativo que esto tendrá en la disponibilidad del agua y la productividad de las plantas, y por ende, en la dinámica de los niveles de humedad en muchas regiones alrededor del mundo y adicionando los diversos factores artificiales como la urbanización, la demanda de energía y la producción de alimentos, los cuales generarán cambios abruptos en la cobertura del suelo [1, 2]. De acuerdo con Seneviratne et al. [3], el nivel de humedad que se encuentra en la zona no saturada constituye la clave que controla los ciclos climáticos, de energía, carbono y el ecosistema. Es importante señalar que la cantidad y distribución del contenido de humedad en el subsuelo también influye otros procesos que son de vital importancia en el balance hidrológico como por ejemplo la actividad

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00094

microbiana, el flujo de nutrientes y la recarga de los acuíferos; por esta razón, la caracterización de las interacciones dinámicas entre la vegetación y la humedad del subsuelo puede jugar un rol importante en el pronóstico de las fuentes hídricas a nivel global y mejorar los modelos de gestión hidrológica tierra → atmósfera.

El problema que se presenta al tratar de caracterizar estas interacciones es la imposibilidad de identificar las trayectorias preferenciales de los flujos subterráneos a una buena resolución bajo condiciones naturales [2]; en diversas investigaciones se reportan el uso de los sensores remotos los cuales proveen información acerca de los contenidos de humedad del subsuelo a escala regional, pero esta metodología no ofrece una buena resolución a nivel espacial ni temporal, aunado al hecho de que posee limitantes en cuanto a la profundidad de investigación; por otro lado, la reflectometría en el dominio temporal y otras metodologías son capaces de ofrecer información puntual de forma muy precisa sobre los contenidos de humedad en el subsuelo y con una notable resolución temporal pero sin la posibilidad de extrapolar a otras escalas.

Ante este panorama, los métodos de prospección geofísica se presentan como una alternativa no invasiva, de bajo costo y optimización del recurso humano reduciendo de esta manera el tiempo en campo. El uso de tomografías repetitivas a lo largo de un mismo perfil constituye una herramienta eficaz a la hora de obtener información sobre la dinámica de los fluidos en el interior de la tierra; por ejemplo, se hace referencia a trabajos que muestran la eficiencia del uso de la misma (imaginería de lapso temporal geoeléctrica 2D) en estudios de trazadores salinos es la geoeléctrica [4, 5, 6, 7] y en estudios estacionales con el fin de cuantificar las variaciones que experimentan los contenidos de humedad en el subsuelo [2, 8, 9, 10, 11, 12].

Este trabajo busca conocer los cambios que experimentan los contenidos de humedad de los suelos en una zona ubicada en la ciudad de Aguadulce, provincia de Coclé a través de un análisis de lapso temporal de tomografía de resistividad eléctrica durante un período comprendido entre julio y octubre de 2019 el cual corresponde a la época de lluvias en el trópico panameño.

II. Area de estudio

A. *Ubicación geográfica y contexto geológico del sitio*

La Figura 1(a) muestra la ubicación geográfica del sitio, la cual presenta coordenadas UTM del punto central: 551454,80 mE y 911537,94 mN.

En base al contexto geológico de la zona y alrededores, el sitio de interés se encuentra caracterizado por la presencia de conglomerados, lutitas, areniscas, areniscas no consolidadas y pómez, propios todos estos elementos de la Formación Río Hato del Período Cuaternario (grupo Aguadulce). La Figura 1(b) presenta un mapa generalizado del área la zona de estudio y sus alrededores.

B. *Vegetación y condiciones climáticas*

En el lado Este de las infraestructuras que albergan el CITT de Aguadulce, se encuentra un micro-bosque cuyo suelo presenta una variada actividad biológica; con el fin de comprender el efecto que causan las lluvias sobre las propiedades eléctricas de los suelos que comprenden (a) dicho micro-bosque y (b) una zona de pastos, se definió un perfil de 23,5 m de longitud en dirección Suroeste-Noreste. La zona de pastos comprende una extensión de 5,5 m aproximadamente a lo largo del perfil, mientras que la zona del micro-bosque, 18 m. La figura 2 ilustra la ubicación de cada zona.

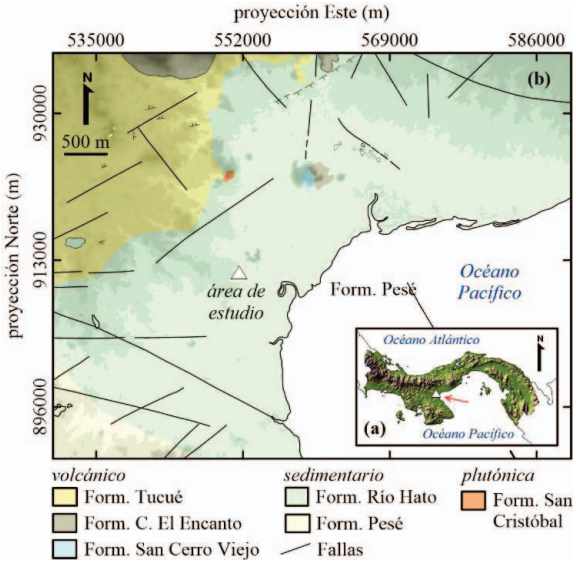


Fig. 1. (a) Ubicación geográfica de la ciudad de Aguadulce, provincia de Coclé y (b) mapa geológico generalizado de la zona de estudio y alrededores.

Fig. 2. Panorámica del área de interés que muestra la zona de pastos y el micro-bosque.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, la zona de estudio se caracteriza por presentar un clima trópico de sabana, con una precipitación anual menor a 2500 mm, con una estación seca prolongada (meses con lluvia menor a 60 mm) en la época de invierno del hemisferio norte; temperatura media del mes más fresco > 18°C, y con una diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y el más fresco <5°C.

La zona donde reposa el distrito de Aguadulce pertenece a la sub-cuenca Río Pocrí, perteneciendo ésta a la cuenca hidrográfica Río Grande el cual cubre una superficie de 2434,04 km^2.

III. Materiales y métodos

A. *Actividad meterológica*

El gráfico de la Figura 3 muestra la actividad meteorológica que se dio lugar en el sitio entre los meses de junio y noviembre de 2019 el cual corresponde al periodo en

donde se desarrollaron las 4 pruebas tomográficas de tipo eléctrica 2D.

- Prueba 1 (9/julio/2019): La actividad pluviométrica registrada los 2 días antes de la prueba registró un total de 21,9 mm y los 3 días anteriores al 7 de julio, no se registraron lluvias. Por su parte, el día de esta primera prueba no se registraron lluvias.

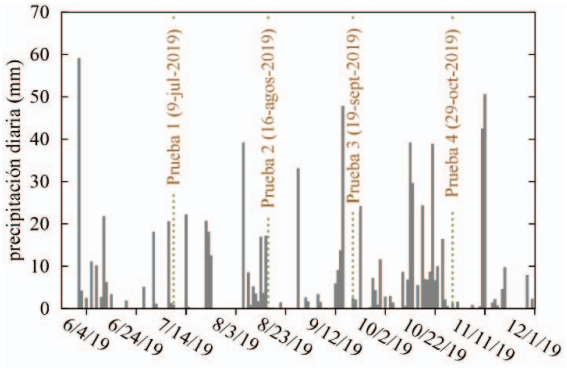


Fig. 3. Gráfico de precipitación diaria entre los meses de junio y noviembre de 2019 con las fechas en que se desarrollaron las 4 jornadas geofísicas.

- Prueba 2 (16/agosto/2019): Desde el 11 hasta el 15 de agosto de 2019 (5 días antes de la prueba), se registraron 43,0 mm de lluvias siendo el 15 de agosto, el día en que se registró el máximo (17,2 mm). El 16 de agosto no se registraron lluvias.
- Prueba 3 (19/septiembre/2019): Los días 14 y 15 de septiembre de 2019 hubo registro de lluvias de 13,7 y 47,8 mm respectivamente obteniéndose un total de 61,5 mm; por otro lado, los 3 siguientes días anteriores a la prueba (16, 17 y 18 de septiembre), no se registró actividad pluviométrica en la zona de interés.
- Prueba 4 (29/octubre/2019): Un total 19,2 mm fue registrado durante los 5 días anteriores a esta cuarta prueba. Los días comprendidos entre el 24 y 27 de octubre de ese año, se registraron valores mínimos y máximos de 0,10 mm y 16,4 mm mientras que el día anterior a la prueba geofísica (28 de octubre), no se registraron lluvias.

B. Mediciones de campo

Cada prueba consistió en la obtención de un conjunto de datos de resistividad eléctrica aparente del subsuelo a partir de un dispositivo Syscal R1 (de IRIS Instruments) interconectado a 48 electrodos separados entre ellos una distancia de 0.5 m.

Una configuración Wenner-Schlumberger fue utilizada en cada una de estas pruebas obteniéndose un total de 529 datos de campo. El tiempo de adquisición se fijó a 500 ms y el número mínimo de inyección de corriente eléctrica se estableció en 3, tomando en cuenta que, si la desviación estándar de estas 3 mediciones superaba el 1%, el dispositivo debía inyectar 3 veces más a fin de garantizar la calidad de la medición en un solo punto.

C. Inversión tomográfica 2D y análisis de lapso temporal

El código de inversión tomográfico 2D utilizado en este trabajo fue el Boundless Electrical Resistivity Tomography – BERT [13, 14]; dicho código se encuentra basado en el método de Gauss-Newton con regularización global. Para el proceso de discretización del subsuelo, el código utiliza la técnica de malla triple la cual se construye en base a los parámetros de entrada. La dimensión de los elementos se incrementa con la profundidad de tal forma que los elementos de mayor dimensión son creados a profundidad o cercano a los límites y tienen extensiones de diversos múltiplos de distancia entre los electrodos. El segundo campo de malla se obtiene a través de un proceso de refinamiento global de los parámetros de dicha malla [13], y con la finalidad de evitar los efectos por las condiciones de frontera, se aplica una prolongación de la malla.

Utilizando la norma l_2 del residual ponderado entre los datos de campo u observaciones ($\mathbf{d}$) y la respuesta del modelo $\mathbf{f}(\mathbf{m})$, la funcional $\Im_d$ puede minimizarse, de acuerdo con Günther et al. [14], a través de la siguiente estructura matemática:

$$\Im_d(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{d_i - f_i(\mathbf{m})}{\epsilon_i} \right|^2 = \left\| \mathbf{D}\left(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})\right) \right\|_2^2 \quad (1)$$

En la ecuación (1) $\mathbf{D}$ = diagonal($1/\varepsilon_i$) y ε el error de los datos de campo o de las observaciones. El código calcula el cambio en el modelo de resistividad ($\Delta\mathbf{m}$) a través de un proceso iterativo, es decir:

$$\gamma^k \Delta\mathbf{m}^k = \mathbf{m}^{k+1} - \mathbf{m}^k \quad (2)$$

En la ecuación (2) γ^k corresponde a un parámetro de búsqueda, y k como el número de la iteración. Este cambio en el modelo de resistividad para cada iteración conlleva a la aplicación del esquema de Gauss-Newton para minimizar $\Im$. De acuerdo con Park y Van, [15]:

$$\Delta\mathbf{m}^k = \left(\mathbf{J}^T\mathbf{D}^T\mathbf{D}\mathbf{J} + \lambda\mathbf{C}^T\mathbf{C}\right)^{-1} \left(\mathbf{J}^T\mathbf{D}^T\mathbf{D}\left(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}^k)\right) - \lambda\mathbf{C}^T\mathbf{C}\left(\mathbf{m}^k - \mathbf{m}^0\right)\right) \quad (3)$$

En la ecuación (3) $\mathbf{C}$ corresponde a una matriz de restricciones, $\mathbf{m}^0$ el modelo de referencia, λ es un parámetro de regularización y $\mathbf{J}$, la matriz Jacobiana o de sensibilidad que contiene las derivadas parciales de las respuestas del modelo con respecto a los parámetros del modelo, es decir:

$$\mathbf{J}_{ij}\left(\mathbf{m}^k\right) = \frac{\partial f_i(\mathbf{m}^k)}{\partial m_j}$$

El objetivo primordial del análisis de lapso temporal de tomografía de resistividad eléctrica es el obtener imágenes del subsuelo que reflejen los cambios en los valores de las resistividades calculadas de forma tal que los modelos plausibles que dependen del tiempo se ajusten a las observaciones. De acuerdo con Günther, [16] el proceso de monitoreo geoeléctrico puede llevarse a cabo de diferentes maneras; en este estudio la inversión se realiza invirtiendo los datos de campo de la primera prueba la cual es considerada como la referencia; para las siguientes pruebas se realiza una inversión completa (minimización) pero considerando que los modelos se encuentran restringidos tomando como referencia el modelo obtenido con la inversión de la primera prueba [17].

Posterior a la inversión, el resultado obtenido corresponderá a cada uno de los cuatro modelos 2D de

resistividad eléctrica calculada y a tres modelos de los cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada.

D. *Los contenidos volumétricos de humedad - resistividad*

Con el objetivo de relacionar el contenido volumétrico de humedad con la resistividad eléctrica del subsuelo, recurrimos a mediciones de laboratorio en donde, de un total de 12 muestras de suelo extraídas del área de estudio (a una profundidad de 20 cm), solo 8 de ellas fueron analizadas debido al estado en que fueron extraídas. Esta metodología ha sido reportada en diversos estudios [12, 18].

Para obtener una relación empírica entre los parámetros mencionados, a cada muestra de suelo se midió el valor de la resistividad eléctrica empleando la norma ASTM D G57-2012, en donde se utilizó un Miller Soil Box con la capacidad de albergar un volumen de 80 cm^3 de suelo; esta caja de plexiglás posee un par de placas metálicas en sus extremos para la conducción de la corriente eléctrica y un par de electrodos de acero inoxidables para la medición del voltaje. La fuente de corriente eléctrica empleada para llevar a cabo las mediciones de resistividad eléctrica de las muestras de suelo fue un LandMapper ERM-02 de Landviser, LLC. Por su parte, para la medición del contenido volumétrico de humedad de dichas muestras, se empleó la norma ASTM D854, en donde las masas de las muestras se registran antes y después del proceso de secado el cual se lleva a cabo a 100°C por 24 horas. Los trabajos de Archie [19] proponen una ecuación empírica que relaciona la resistividad eléctrica de la formación (ρ) con el contenido volumétrico de humedad (θ):

$$\frac{\rho}{\rho_w} = \frac{a}{\theta^m} \tag{4}$$

La ecuación (4) revela la relación potencial decreciente que existe entre ρ y θ; a y m corresponden a constantes empíricas y ρ_w es la resistividad volumétrica de una muestra de suelo completamente saturada.

IV. Resultados y Discusión

A. *Contenido volumétrico de humedad vs resistividad eléctrica (ley de Archie)*

Los resultados obtenidos en el laboratorio en relación con las ocho muestras analizadas, dio por resultado el gráfico de la Figura 4.

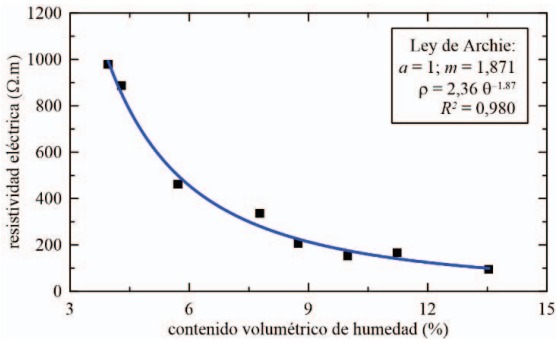


Fig. 4. Relación entre la resistividad eléctrica (ρ) y el contenido volumétrico de humedad (θ) de las 8 muestras de suelo obtenidas en el sitio de trabajo.

B. *Pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente medidas*

El conjunto de los 2116 datos de campo obtenidos en este trabajo de investigación (como producto de las mediciones realizadas en las cuatro fechas ya antes mencionadas), pueden ser representados a través de pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente, tal como lo muestra la imagen de la Figura 5. En la misma se presenta una distribución de valores máximos de resistividad eléctrica aparente medidos u observaciones (en tonalidades rojo y amarillo) hacia el lado del micro-bosque por parte de las 4 pruebas realizadas, mientras que los mínimos representados en tonalidades azul y celeste se concentran en la zona de pastos.

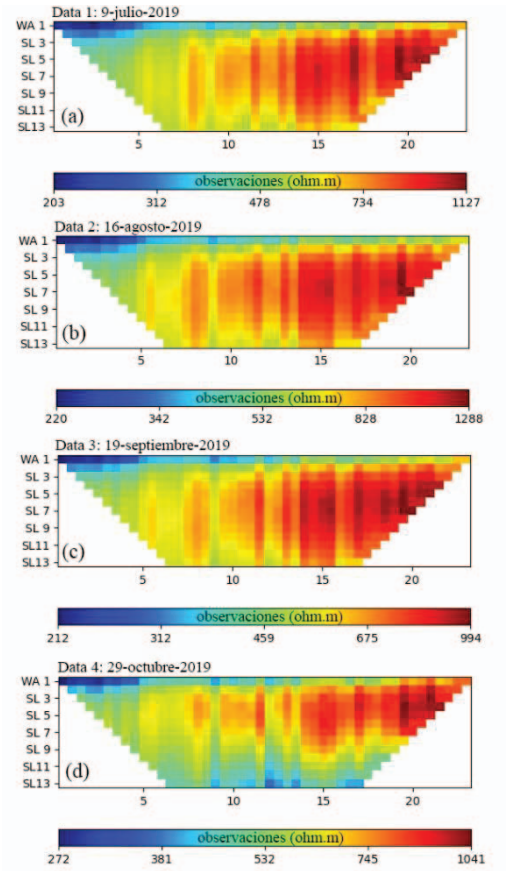


Fig. 5. Pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente (observaciones) obtenidos durante las jornadas (a) 1, (b) 2, (c) 3 y (d) 4.

Es importante recalcar que esta representación gráfica no se puede interpretar como una tomografía final en sí, ya que se requiere de la inversión de estos datos para poder obtener un modelo acorde con la realidad geológica del sitio. El rango de valores de resistividad eléctrica aparente medidos en campo, para estas cuatro pruebas, oscila entre 203 y 1288 ohm.m.

C. *Resultados del análisis de lapso temporal de tomografía de resistividad eléctrica 2D*

En esta sección se presentan los resultados de los procesos de inversión obtenidos con el código BERT estableciendo como valor del parámetro de regularización $\lambda = 20$. Este parámetro controla la intensidad de restricción suave y, por

ende, define qué tan suave el modelo final es. La Figura 6 presenta el resultado de la inversión de las 4 pruebas.

El rango de valores de resistividad eléctrica calculada que presentan estos resultados oscila entre 92 y 3390 ohm.m; en las cuatro tomografías se puede identificar a nivel superficial una anomalía en tonalidad azul cuyo rango de valores de resistividad eléctrica calculada varía entre 92 y 558 ohm.m y con profundidades que no superan 1 m.

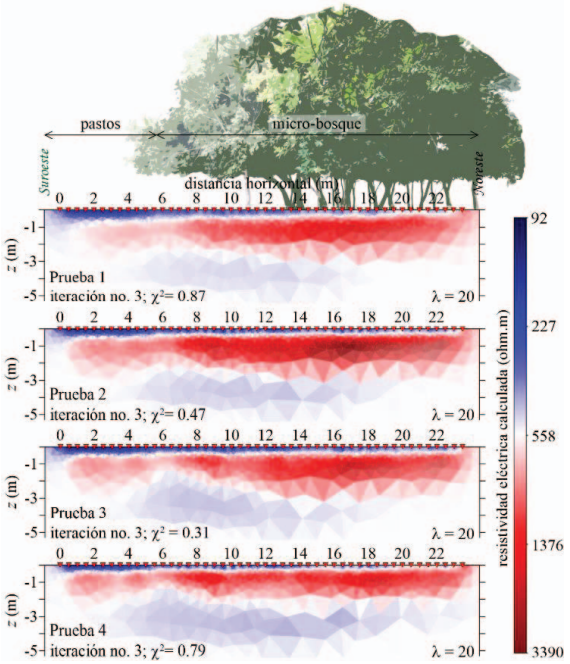


Fig. 6 Tomografías de resistividad eléctrica obtenidas posterior a la resolución del problema inverso (λ = 20) a través del análisis de lapso temporal tomográfico.

Las Pruebas 1 y 2 muestran una mayor extensión de dicha anomalía tanto a nivel lateral como en profundidad; esto se encuentra relacionado a la presencia de fuertes lluvias que se dieron lugar durante los días anteriores a estas pruebas, ya que la presencia de humedad en el subsuelo genera una disminución de sus propiedades eléctricas. Por su parte, la ausencia de lluvias durante los días anteriores a las Pruebas 3 y 4 se revela a través de disminución en la dimensión de la anomalía de baja resistividad eléctrica calculada.

Por otro lado, se puede identificar claramente una anomalía de resistividad eléctrica en tonalidad roja, y con valores de resistividad eléctrica calculada que oscilan entre 558 y 3390 ohm.m, con una profundidad que varía entre 1.5 y 3.0 m. Esta anomalía se presenta en todas las pruebas, y los valores más altos de resistividad se concentran en el micro-bosque por la presencia de las raíces; sin embargo, su intensidad se incrementa en la Prueba 2 mientras que en el resultado obtenido en la Prueba 4, hay una disminución en su dimensión. En la zona de pastos, se observa que la intensidad de la mencionada anomalía disminuye notablemente como producto de la ausencia de raíces de gran magnitud.

A partir de estos resultados, el código generó un conjunto de tomogramas de cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada tal como lo muestra la Figura 7. En este resultado, las variaciones positivas representadas en tonalidades amarillo y rojo y con valores porcentuales que oscilan entre 25% y 100%, indican un aumento en el valor de la resistividad eléctrica del subsuelo y por ende, una disminución en su contenido de humedad; contrariamente, las variaciones negativas representadas en tonalidades celeste y azul oscuro y con valores porcentuales que se extienden entre -12.5% y 100% indican una disminución en el valor de la resistividad eléctrica y con ello, un incremento en el contenido de humedad del subsuelo.

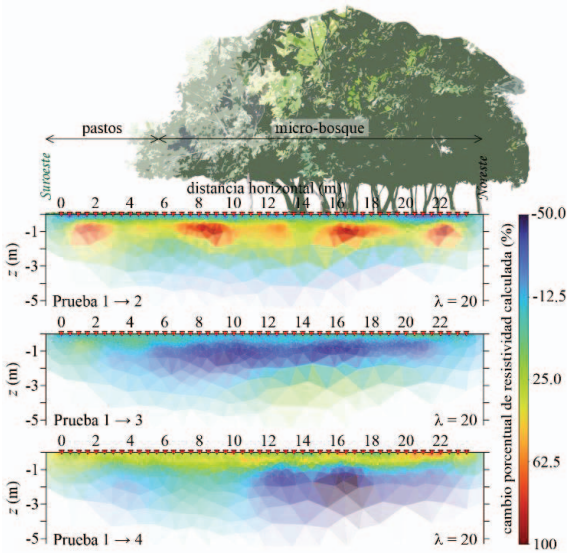


Fig. 7. Tomografías de los cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada que se dieron lugar entre la prueba 1 → 2 (superior), la prueba 1 → 3 (centro) y la prueba 1 → 4 (inferior), para λ = 20.

En el primer resultado de la Figura 7 (Prueba 1 → 2) se presenta un horizonte superficial en tonalidades celeste y azul los cuales revelan una disminución de la resistividad eléctrica calculada hasta una profundidad de aproximadamente 0.4 m; este efecto podría asociarse al fuerte nivel de precipitación que se dio lugar el día anterior de la Prueba 2, en relación con el día anterior de la Prueba 1 cuyo nivel de precipitación fue inferior. Seguidamente, se presenta una anomalía porcentual de valores positivos indicando un fuerte grado de absorción de humedad en el subsuelo de la zona constituida por el micro-bosque.

En el segundo resultado (Prueba 1 → 3), los cambios porcentuales negativos se presentan casi en la totalidad del espacio ocupado por la tomografía, incrementándose más hacia el máximo (-50 %) en la zona ubicada por debajo del micro-bosque. Esta disminución de la resistividad eléctrica calculada indica una disminución en los niveles de absorción de humedad por las raíces de los árboles que forman parte del micro-bosque. Por otro lado, la zona de pastos no presenta cambios significativos en los valores de resistividad eléctrica calculada.

Por su parte, en el tercer resultado (prueba 1 → 4) se puede identificar una anomalía de cambio porcentual en tonalidad amarilla la cual se extiende sobre todo el perfil y alcanza una profundidad que varía entre 0.5 y 1.0 m, hecho que indica un aumento entre aproximadamente 25.0% y 62.5%. Esta anomalía refleja un déficit superficial de humedad entre la

primera y última prueba. Sin embargo, la anomalía de cambio porcentual de resistividad eléctrica calculada en tonalidad azul (en la zona del micro-bosque) tiende a reducirse lateralmente, pero tiende a extenderse levemente de forma vertical. El resto de las anomalías en tono celeste, las cuales representan cambios o disminuciones moderados en el valor de la resistividad eléctrica calculada, ocupan los primeros 10 m del perfil por debajo de la anomalía en tonos amarillo y café, lo que indica también un bajo nivel de absorción por parte de las raíces que forman parte del micro-bosque y de la zona de pastos.

D. Tomografías de contenido volumétrico de humedad

Transformando las tomografías de resistividad eléctrica calculada de la Figura 6 en tomogramas de contenido volumétrico de humedad (empleando la misma ecuación empírica obtenida a través de la Ley de Archie, se obtuvo el resultado de la Figura 8.

En este resultado se observa que los valores más bajos de contenido volumétrico de humedad (representados a través de anomalías en tonalidades rojo ladrillo y amarillos y con valores que oscilan entre 2.0% y 3.3 %) se concentran por debajo de la zona del micro-bosque mientas que los más altos, representado en tonos azules (8.7% y 17.4 %) se concentran en la zona de pastos.

Es importante recalcar que valores intermedios de contenido volumétrico de humedad (5.4% y 8.7 %) se pueden identificar claramente entre los 6 m y el resto del perfil de forma superficial. Este resultado concuerda con las interpretaciones presentadas en las subsecciones anteriores en donde las raíces del micro-bosque tienden a absorber mayor humedad mientras que la zona de pastos tiende a reducir el nivel de absorción de humedad.

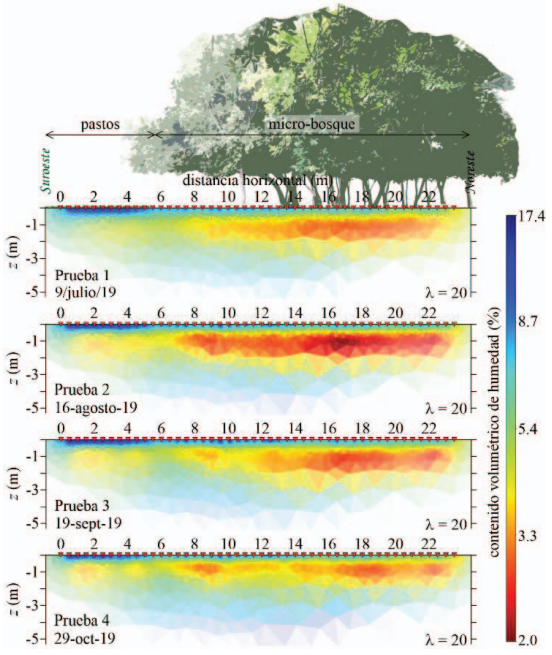


Fig. 8. contenidos volumétricos de humedad derivados de la aplicación de la ley empírica de Archie (ecuación 4) al conjunto de valores de resistividad eléctrica calculada para λ = 20.

CONCLUSIONES

Se logró establecer una zona de estudio muy importante ubicada en una zona abierta del CITT-UTP de Aguadulce y cuya importancia radica en que forma parte del Arco Seco del Istmo de Panamá, estando la misma compuesta por una zona de pastos y la otra, por un micro-bosque constituida por árboles y una notable actividad biológica a nivel de subsuelo; también hemos seleccionado un período de aproximadamente cuatro meses, a partir del 9 de julio, hasta el 29 de octubre de 2019 correspondiente a la época lluviosa del año, y siendo octubre la más intensa a nivel de actividad pluviométrica. Las tomografías de resistividad eléctrica obtenidas lograron cuantificar de forma clara los contrastes existentes entre ambas zonas (ausencia y presencia de raíces). Por otro lado, la transformación de los valores de resistividad eléctrica calculada (producto de la inversión 2D) a valores de contenido volumétrico de humedad (mediante la Ley de Archie), nos permitieron cuantificar las diferencias en los niveles de absorción de humedad en los dos tipos de vegetación, siendo la zona compuesta por raíces del micro-bosque, caracterizada por presentar un rango bajo de valores de contenido volumétrico de humedad (zona de mayor absorción de agua) registrándose menor nivel de humedad durante la Prueba 2; y la zona de pastos, con el de mayor rango de estos valores, con una mayor concentración de humedad durante la Prueba 1. Los resultados se ajustan a la actividad pluviométrica registrada durante los cinco días que antecedieron a cada prueba. Por otro lado, el monitoreo de los cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada (producto de la inversión geofísica), mostró la evolución de los niveles de humedad de la zona de estudio como respuesta a las variaciones climáticas y los procesos de vegetación, con cambios poco significativas a nivel superficial entre las Pruebas 1 y 2 debido a la ocurrencia de lluvias durante ese período, pero con un aumento en el cambio porcentual en el área de las raíces del micro-bosque lo que indica un mayor nivel de absorción de humedad bajo todo el perfil entre esas fechas. En los resultados consecutivos, se presenta una disminución en los niveles de absorción en el área de las raíces del micro-bosque, y un leve aumento entre las pruebas 1 y 4 debido a la disminución en la razón de lluvias ocurrida entre ambas pruebas. Estos resultados pueden ser clave en el desarrollo de nuevas herramientas que permitan anticipar cambios globales en el uso del subsuelo que estén ligados a procesos antrópicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Centro Experimental de Ingeniería y al Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica (CITT) de la Universidad Tecnológica de Panamá por las facilidades brindadas en el desarrollo de los trabajos de campo, y a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) por todo el apoyo para el desarrollo de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

[1] B. R. Scanlon, I. Joly, M. Sophocleous, y L. Zahang, "Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality," *Water Resour. Res.*, vol. 43, pp. W03437, Marzo 2007.

[2] D. H. Jayawickreme, R. L. Van Dam, y D. W. Hyndman, "Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, pp. L18404, Septiembre 2008.

[3] S. I. Seneviratne, D. Lüthi, M. Litschi, y C. Schär, "Land-atmosphere coupling and climate change in Europe," *Nature*, vol. 443, pp. 205–209, Septiembre 2006.

[4] R. Barker, y J. Moore, “The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies,” *The Leading Edge*, vol. 17, pp. 1454–1458, Octubre 1998.

[5] K. Singha, y S.M. Gorelick, “Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis,” *Water Resour. Res.*, vol. 41, pp. W05023, Mayo 2005.

[6] V. Leroux, y T. Dahlin, “Time-lapse resistivity investigations for imaging saltwater transport in glaciofluvial deposits,” *Environ. Geol.*, vol. 49, pp. 347–358, Noviembre 2005.

[7] G. Casiani, V. Bruno, A. Villa, N. Fusi, y A. Binley, “A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography,” *J. Appl. Geophy.*, vol. 59, pp. 244–259, Julio 2006.

[8] C. R. Miller, P. S. Routh, T. R. Brosten, y J. P. McNamara, “Application of time-lapse ERT imaging to watershed characterisation,” *Geophysics*, vol. 73, pp. 7–17, Mayo 2008.

[9] P. Brunet, R. Clément, y C. Bouvier, “Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT)–A case study in the Cevennes area, France,” *J. Hydrol.*, vol. 380, pp. 146–153, Enero 2010.

[10] A. Mojica, I. Díaz, C. A. Ho, F. Ogden, R. Pinzón, J. Fábrega, D. Vega, y J. Hendrickx, “Study of seasonal rainfall infiltration via time-lapse surface electrical resistivity tomography. A case study of Gamboa area, Panama Canal Watershed,” *Air, Soil Water Res.*, vol. 6, pp. 131–139, Diciembre 2013.

[11] G. F. Litt, F. L. Ogden, A. Mojica, E. W. Kempema, C. B. Gardner, J. A. Regina, J. Bruce, J. Harrison, J. M. H. Hendrickx, M. Bretfeld, Y. Cheng, R. F. Stallard, J. S. Hall, y W. B. Lyons, “Land Cover Effects on Soil Infiltration Capacity Measured Using Plot Scale Rainfall Simulation in Steep Tropical Lowlands of Central Panama,” *Hydrol. Process.*, vol. 34, pp. 878–897, Febrero 2020.

[12] A. Mojica, B. Duarte, F. Vergara, M. Pinto, R. Pinzón, J. Pérez, M. Castrellón, C. A. Ho, y M. Gómez, “Time-lapse electrical resistivity tomography for assessment of seasonal moisture variations in a tropical regolith,” *Hydrol. Res. Lett.*, vol. 16, pp. 18–24, Marzo 2022.

[13] C. Rücker, T. Günther, y K. Spitzer, “Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity dataincorporating topography-I. Modelling,” *Geophys. J. Int.*, vol. 166, pp. 495–505, Agosto 2006.

[14] T. Günther, C. Rucker, y K. Spitzer, “Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography-II. Inversion,” *Geophys. J. Int.*, vol. 166, pp. 506–517, Agosto 2006.

[15] S. K. Park, y G. P. Van, “Inversion of pole-pole data for 3-d resistivity structure beneath arrays of electrodes,” *Geophysics*, vol. 56, pp. 951–960, Julio 1991.

[16] T. Günther, “Timelapse ERT inversion approaches and their applications,” in *1st International Workshop on Geoelectrical Monitoring (GELMON)*, Vienna, Austria, 2011, pp. 91–97.

[17] T. Günther, y C. Rücker, “Boundless Electrical Resistivity Tomography BERT 2,” the user tutorial, Abril 2019. Disponible en: http://www.resistivity.net/download/bert-tutorial.pdf

[18] P. Wilkinson, J. Chambers, O. Kuras, P. Meldrum, y D. Gunn, “Long-term time-lapse geoelectrical monitoring,” *First Break*, vol. 29, pp. 77–84, Agosto 2011.

[19] G. E. Archie, “The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics,” *Petroleum Transactions of AIME*, vol. 146, pp. 54–67, Diciembre 1942.

Groundwater budget of the Zaratí river sub-catchment.

Balance hídrico subterráneo en la subcuenca del río Zaratí.

Milagros Lorenzo
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
milagros.lorenzo@utp.ac.pa

Érica Sanchez
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
erica.sanchez@utp.ac.pa

Melisabel Muñoz
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
melisabel.munoz@utp.ac.pa

José Fábrega
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigadores
Panamá, Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

Jorge A. Leiva
Escuela de Agronomía
Universidad de Costa Rica
Liberia, Costa Rica
jorge.leivasanabria@ucr.ac.cr

María Gabriela Castrellón
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
mariag.castrellon@gmail.com

***Abstract* — A groundwater balance is calculated considering inputs, outputs, and changes in storage, which occur in a specific volume of the aquifer in a given period of time. Therefore, as a general objective, it is proposed to study the behavior of groundwater in the middle and lower part of the sub-basin of the Zarati river to know its potential use as a possible source of water supply for the area of Penonome. Measurements of flows in the Zarati river and piezometric levels in monitoring wells were made. Information was obtained from the National Institute of Aqueducts and Sewers (IDAAN for its Spanish acronym) on the extraction flow of the active wells and the production flow of the Penonome potable water treatment plant. The results indicate that, the piezometric level in the monitoring wells decrease during the dry season, affecting the water supply. Also, that the groundwater flow descends from the middle part until reaching the lower sub-catchment, where most look towards the flow areas of the Zarati river. A volume of river-aquifer interaction of $\Delta V = -1.73 \times m^3$ was obtained and it was determined that the aquifer feeds the river. It is recommended to design and implement a monitoring program in active wells that are within the Zarati river sub-catchment, which allows planning and managing efficiently in the long term, the quantity and quality of water for supply of the population.**

Keywords — groundwater, balance, Zaratí river, sub-basin, Penonome

***Resumen* —Un balance de aguas subterráneas se calcula tomando en cuenta las entradas, salidas y cambios en el almacenamiento, que se dan en un volumen específico del acuífero en un determinado lapso de tiempo. Por lo tanto, como objetivo general, se propone estudiar el comportamiento del agua subterránea de la parte media y baja de la subcuenca del río Zaratí con la finalidad de conocer su uso potencial como posible fuente abastecedora de agua para el área de Penonomé. Se realizaron mediciones de caudales en el río Zaratí y de niveles piezométricos en pozos de monitoreo. Se obtuvo información por parte del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) sobre el caudal de extracción de los pozos activos y el caudal de producción de la potabilizadora de Penonomé. Los resultados indican que, el nivel piezométrico en los pozos de monitoreo disminuye durante la época seca, afectando el suministro de agua, que el flujo del agua subterránea desciende desde la parte media, hasta llegar a la subcuenca baja, donde la mayoría buscan hacia las áreas de flujo del río Zaratí. Se obtuvo un volumen de interacción río-acuífero de $\Delta V = -1.73 \, x \, 10^7 \, m^3$ y se pudo determinar que el acuífero alimenta al río. Se recomienda diseñar e implementar un programa de monitoreo en pozos activos que están dentro de la subcuenca del río Zaratí, que permita planificar y gestionar de manera eficiente a largo plazo, la cantidad y calidad de agua para suministro de la población.**

Palabras claves — aguas subterráneas, balance, río Zaratí, subcuenca, Penonomé.

I. Introducción

El área de estudio está situada específicamente en el distrito de Penonomé, sobre los corregimientos de Penonomé Cabecera, Cañaveral, Coclé, El Coco y Pajonal, provincia de Coclé. Para definir el área de estudio se tomó en cuenta la geología e hidrología, así como la presencia de pozos inactivos. Tiene una extensión de aproximadamente 155057.14 km^2. Abarca la parte media y baja de la subcuenca del río Zaratí, como se observa en la Fig. 1. El río Zaratí es una afluente del río Grande, correspondiente a la cuenca número 134. Esta numeración fue establecida por el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (PHCA, 1967-1972) donde se unificó criterios para la numeración y diseño de las cuencas hidrográficas principales en todos los países de Centroamérica (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá).

El río Zaratí nace a una elevación aproximada de 950 m.s.n.m., esto en la parte norte del distrito de Penonomé,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00095

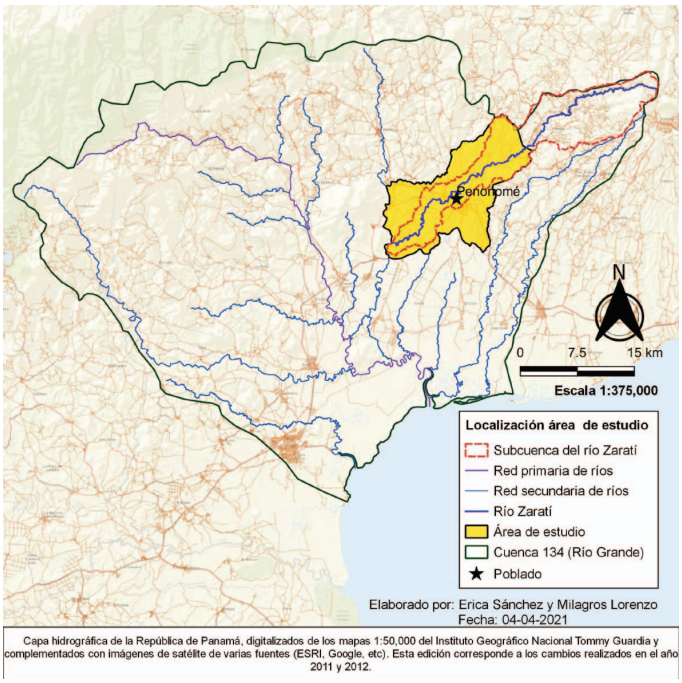


Fig. 1 Localización del área de estudio en la cuenca de río Grande [6].

provincia de Coclé. Desemboca en el río Coclé del Sur a una elevación aproximada de 25 m.s.n.m., este a su vez converge en el río Las Guabas, el cual desagua en el río Grande [1].

El área de estudio se encuentra en la región del Pacífico Central de Panamá, por lo tanto, experimenta dos estaciones. De acuerdo al promedio histórico [2], la estación lluviosa que va desde mediados de mayo a mediados de diciembre presenta una precipitación promedio para estos meses de 241.9 mm. La estación seca desde mediados de diciembre a mediados de mayo presenta una precipitación promedio para estos meses de 31.62 mm. Estos valores corresponden a los datos proporcionados por la estación Sonadora (134-008), administrada por la dirección de Hidrometeorología de la Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA), la cual es la única estación meteorológica que se encuentra dentro del área de estudio [3].

El distrito de Penonomé presenta un creciente desarrollo urbanístico lo cual se traduce en un aumento en la demanda de agua. Esta demanda se satisface en gran medida con las aguas del río Zaratí, mediante la planta potabilizadora Efraín Meneses la cual está ubicada en la parte media de la subcuenca. Debido a los efectos del cambio climático, las precipitaciones de larga duración provocan crecidas del río Zaratí y estas causan alteraciones en la calidad del agua a la altura de la toma de la potabilizadora la cual queda fuera de servicio durante 24 horas o más, afectando así a muchos usuarios. Adicional, se dan temporadas secas prolongadas que provocan la escasez de agua en diferentes comunidades del distrito. Por ello, el IDAAN-Penonomé, en los últimos años, ha optado por reactivar pozos que habían sido construidos pero que se encontraban fuera de servicio. Esto con el objetivo de afectar lo menos posible el suministro de agua a la población demandante.

En la tesis de Márquez & Carranza presentado en 2021, se concluyó que la actual problemática de los bajos niveles de los pozos en sectores de la zona baja de la SRZ podría derivarse de la extracción de agua subterránea sin regulación, ya que los resultados de textura de suelo, tasa de infiltración y conductividad hidráulica no saturada, muestran que a través de la zona baja de la cuenca existe alta capacidad para la infiltración [4]. Esto considerando que para el estudio se tomó muestras de suelo de los primeros 10 cm de profundidad, es decir que el estudio se hizo de forma superficial.

Uno de los principales problemas de la explotación de las aguas subterráneas en Coclé y a nivel nacional es la ausencia de un sistema de monitoreo sobre el comportamiento de estas. Según la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), actualmente el Ministerio de Ambiente (MiAMBIENTE), hay poca información disponible sobre las aguas subterráneas del país.

Por otra parte, en el artículo de Castrellón & Otros publicado en 2021, se concluyó que los suelos de la parte media-baja de la subcuenca del río Zaratí son ultisoles meteorizados, arcillosos, pobres en materia orgánica, con pobre infiltración, ricos en plintita, para los cuales se recomendó promover su recuperación por medio de coberturas forestales y enmiendas orgánicas [5]. Hay que aclarar que en este estudio a diferencia del anterior se tomó muestras de suelos de hasta aproximadamente 2 metros de profundidad.

Conocer como influyen las diferentes variables dentro del balance hídrico permite identificar si la capacidad de un acuífero está siendo sobreexplotado o no. Esto se puede lograr mediante un constante monitoreo de las variables involucradas.

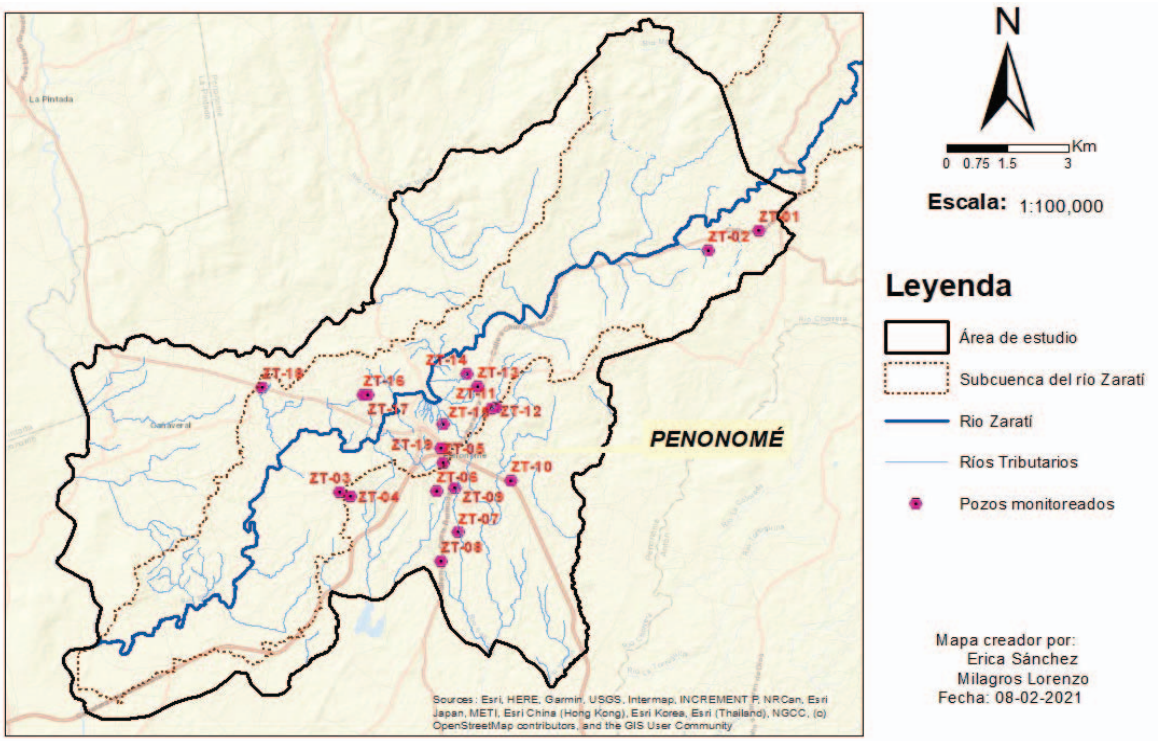


Fig. 2 Localización de pozos de monitoreo [6].

El objetivo general de esta investigación es realizar el balance hídrico subterráneo de la parte media-baja de la subcuenca del río Zaratí para evaluar la dinámica entre el acuífero y el río. Como objetivos específicos se pretende analizar los registros de precipitación, caracterizar los niveles de aguas subterráneas de la subcuenca del río Zaratí, evaluar datos de caudales, describir la dirección del flujo de agua subterránea y determinar si existe intercambio de caudal en la frontera.

Este estudio determina de forma aproximada si el cambio de almacenamiento es igual a la diferencia entre las variables de entrada y salida. Si esto no se cumple entonces se puede decir que existe un caudal de intercambio en las fronteras del área de estudio. La metodología utilizada en este trabajo puede ser utilizada para estudios posteriores en el área de estudio ya que, brinda las herramientas necesarias para calcular un balance hídrico subterráneo, cuyos resultados podrán ser utilizados por las instituciones encargadas del manejo de agua subterránea para la toma de decisiones en cuanto a explotación y administración de esta fuente vital.

II. Metodología

A. Recolección de datos

Se realizaron giras de campo para obtener información sobre pozos que estuvieran dentro o cercanos al área de estudio y pudieran ser utilizados posteriormente como pozos de monitoreo. Se localizaron 61 pozos, de los cuales 32 fueron pozos activos y 29 fueron inactivos. Dentro de la base de datos obtenida de los pozos, se realizó una selección de pozos de monitoreo teniendo en cuenta parámetros como los siguientes: ubicación dentro del área de estudio, que fueran pozos inactivos y que contaran con información de registros litológicos. Esta selección contenía 19 pozos, ver Fig 2. En el período de estudio evaluado para este trabajo, que comprendió de enero a febrero (estación seca) de 2020, se logró medir la profundidad al nivel estático en los pozos de monitoreo. Esta información permitió calcular la elevación del nivel piezométrico en estos pozos, utilizando la siguiente ecuación:

$$h = Z - y \qquad (1)$$

donde h es el nivel piezométrico (L), Z es la elevación del terreno (L) y y es la profundidad al nivel estático (L). Para conocer la elevación del terreno, se usó el Modelo de elevación digital de la República de Panamá (DEM). Los datos obtenidos se usaron para elaborar mapas donde se pudiera mostrar la dirección de flujo de las aguas subterráneas que resultaron de unir líneas de corriente perpendiculares a las cotas de igual nivel piezométrico [6]. Dentro del área de estudio se instalaron dos pluviómetros para registrar el comportamiento de las precipitaciones durante el periodo evaluado. Estos están localizados en Paso Ancho y en El Barrero Cercanos al área de estudio también están instalados dos pluviómetros adicionales en las comunidades de Sofre y Alto de la Estancia como se muestra en la Fig. 3.

Se realizaron mediciones, de caudal a lo largo del río Zaratí en tres puntos (Sofre, El Barrero y Paso Ancho) y dos de sus afluentes. La primera medición se realizó en agosto de 2019 (temporada lluviosa) y la segunda en enero de 2020 (temporada seca). Para realizar el balance hídrico del área de estudio se consideraron solo dos puntos de aforos: Punto de aforo (1) ubicado en El Barrero y punto de aforo (2) ubicado en Paso Ancho, con la finalidad de obtener la diferencia del

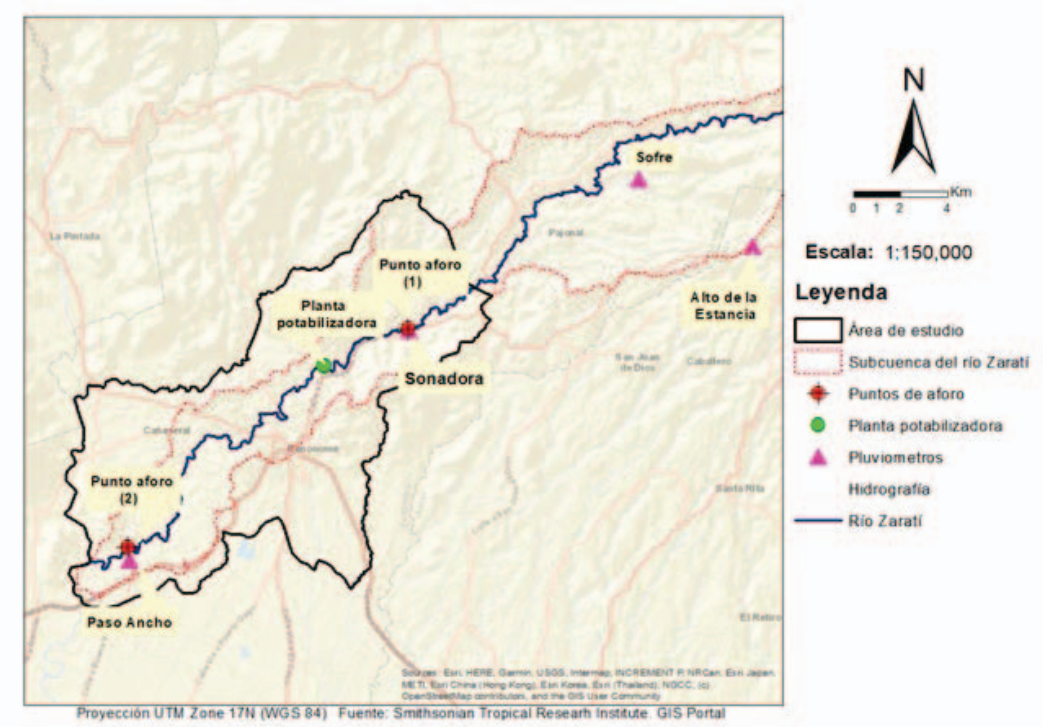


Fig. 3 Localización de pluviómetros, puntos de aforo sobre el río Zaratí y planta potabilizadora de Penonomé [6].

caudal base medido entre estos dos puntos, durante la temporada seca como se observa en la Fig. 3.

B. Balance hídrico subterráneo

La ecuación general de balance, de acuerdo con la ley de la conservación de la masa es la ecuación (2) y la ecuación (3) muestra el balance hídrico subterráneo del área de estudio.

$$Entradas - Salidas = Cambio\ de\ Almacenamiento \quad (2)$$

$$R - \Delta V_{pozos} - \Delta V_{río-acuífero} \pm \Delta V_{frontera-acuífero} = \Delta V_{acuífero} \quad (3)$$

donde R es la recarga (L^3), ΔV_{pozos} es el volumen de extracción de pozos activos (L^3), $\Delta V_{río-acuífero}$ es el volumen de intercambio entre el río y el acuífero (L^3), $\Delta V_{frontera}$ es el cambio de volumen en la frontera (L^3) y la incógnita en este esta investigación, $\Delta V_{acuífero}$ es el cambio de almacenamiento (L^3).

C.1 Cálculo de los componentes del balance hídrico subterráneo

C.1.1 Entrada

Se calculó inicialmente el volumen de precipitación ($V_{precipitación}$) durante los meses de enero-febrero 2020, utilizando la ecuación (4):

$$V_{precipitación} = P_m \times A_{ae} \quad (4)$$

donde P_m es la precipitación promedio obtenida por medio del método de polígono de Thiessen (L), A_{ae} es área de estudio (L^2). La recarga se calculó estimando una fracción del volumen de precipitación obtenido para el área de estudio, utilizando la ecuación (5):

$$R = V_{precipitación} \cdot factor\ de\ recarga\ _{asumido} \quad (5)$$

donde $V_{precipitación}$ es el volumen de precipitación en el período de estudio, $factor\ de\ recarga\ _{asumido}$ se estimó un valor entre 2% a 3% de la precipitación [7]. El área de estudio puede considerarse como zona de tránsito, ya que se desarrolla la explotación de las aguas subterráneas mediante pozos.

C.1.2 Salidas

C.1.2.1 Volumen de extracción de pozos

Para conocer el volumen extraído del acuífero por medio de pozos activos en el área de estudio, se utilizó información suministrada por la agencia regional de IDAAN de Penonomé en enero de 2020, donde detallaba el caudal de extracción por pozos en galones por minutos. Se hizo una sumatoria de los caudales de extracción, durante este período, en los 8 pozos activos en el área de estudio, la cual dio un valor de 0.0391 m^3/s (620 galones por minuto).

C.1.2.2 Volumen de intercambio río-acuífero

Dependiendo del clima de una región, las aguas superficiales suministran recarga al acuífero subyacente, o el acuífero descarga y nutre a los cuerpos de aguas superficiales [5]. Para el cálculo del volumen de agua que se intercambia entre el río Zaratí y el acuífero subyacente, se utilizó la

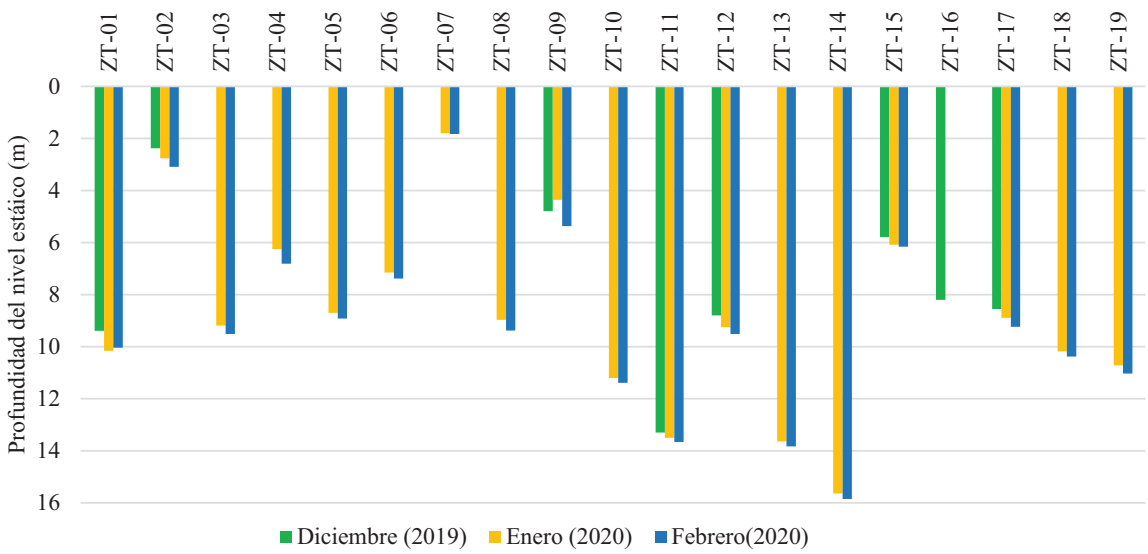


Fig. 4 Profundidad del nivel estático de pozos monitoreados [6].

información obtenida de los caudales en los puntos de aforos, en enero de 2020.

Punto aforo (1): El Barrero

$$Q_{1=\,1.12\ m^3/s}$$

Punto aforo (2): Paso Ancho

$$Q_{2=\,0.91\ m^3/s}$$

Se tomó en cuenta el valor del caudal de extracción de la planta potabilizadora, por encontrarse entre los dos puntos de aforo.

$$Q_{potabilizadora\,=\,0.22\ m^3/s}$$

Estos valores de caudales se transformaron a volumen y se obtuvo la siguiente información, mostrada en la TABLA 1.

TABLA 1 VOLUMEN DE LOS PUNTOS DE AFORO Y DE LA PLANTA POTABILIZADORA [6]

Punto	Volumen (m³)
El Barrero (aguas arriba)	2709504
Planta potabilizadora	532224
Paso Ancho (aguas abajo)	2201472

Se utilizó la ecuación (6) para calcular el volumen de intercambio entre el río y el acuífero (6).

$$V_{río-acuífero} = V_{aguas\ abajo} - V_{aguas\ arriba} \qquad (6)$$

donde $V_{río-acuífero}$ es el volumen que intercambia el río con el acuífero (L^3), $V_{aguas\ abajo}$ es el volumen en el punto de aforo 2 (L^3) y $V_{aguas\ arriba}$ es el volumen en el punto de aforo 1 (L^3).

Reemplazando las incógnitas queda la ecuación (7).

$$V_{río-acuífero} = V_{Pto2} - (V_{Pto1} - V_{Potabilizadora}) \qquad (7)$$

Para conocer si el río Zaratí es un río efluente o influente se asumió lo siguiente:

Si $V_{pto\,2} > V_{pto\,1}$ (El río extrae agua del acuífero, efluente)

Si $V_{pto\,2} < V_{pto\,1}$ (El río aporta agua al acuífero, influente)

C.1.2.3 Cambio de almacenamiento

Para el cálculo del cambio de almacenamiento en el área de estudio, se utilizó la ecuación (8).

$$\Delta\, V_{acuífero} = \left(\overline{\Delta H_{gw}}\right) \cdot [(\eta) \cdot\ (A_{ae})] \qquad (8)$$

donde $\Delta\, V_{acuífero}$ es el cambio de almacenamiento en el acuífero (L^3), $\overline{\Delta H_{gw}}$ es el promedio del cambio de elevación del agua subterránea en los meses de enero y febrero de 2020 (L) y η es la porosidad del suelo (adimensional).

Para obtener el valor de $\overline{\Delta H_{gw}}$ se utilizó la ecuación (9).

$$\overline{\Delta H_{gw}} = \Delta H_{gw\,(febrero)} - \Delta H_{gw\,(enero)} \qquad (9)$$

donde $\Delta H_{gw\,(febrero)}$ (L) y $\Delta H_{gw\,(enero)}$ (L) son los cambios de elevación promedio del agua subterránea correspondientes a los meses de febrero 2020 y enero 2020, respectivamente. Para obtener cambio promedio de elevación del agua subterránea en cada mes $\overline{\Delta H_{gw(mes)}}$ se utilizó la ecuación (10).

$$\overline{\Delta H_{gw(mes)}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \Delta H_{gw\,k}}{T_p} \qquad (10)$$

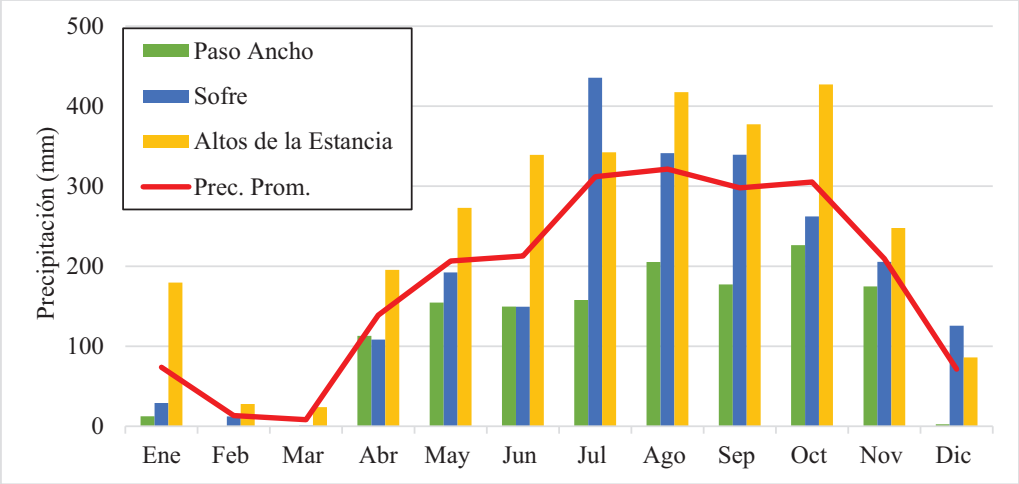


Fig. 5 Precipitación promedio para el área de estudio.

donde $\overline{\Delta H_{gw(mes)}}$ es el promedio del cambio de elevación en el mes de estudio, $\sum_{k=1}^{n} \Delta H_{gw\,k}$ es la sumatoria de los cambios de elevación (L) de los pozos de monitoreo, T_p es el total de pozos con medidas de cambio de elevación (L).

C.1.3 Volumen de intercambio con la frontera.

Con el cálculo del balance hídrico se buscaba conocer el volumen de agua que se intercambia desde o hacia del área de estudio a través de las fronteras. Conocidos los datos que componen el balance hídrico del área de estudio y despejando la ecuación (3) se calculó el volumen de intercambio con las fronteras, como se presenta en la ecuación (11):

$$\pm\Delta V_{frontera-acuífero} = \Delta V_{acuífero} - R + \Delta V_{pozos} + \Delta V_{río-acuífero} \quad (11)$$

III. Resultados y Discusión

A continuación, se describen los resultados del balance hídrico de la parte media-baja de la subcuenca del río Zaratí, para el período enero-febrero 2020.

A. Niveles piezométricos

Según un estudio realizado en el año 2017, durante la temporada lluviosa, los niveles piezométricos en el área de estudio se encuentran más cercanos a la superficie del terreno natural, que durante la temporada seca [8]. Durante el período evaluado, la profundidad del nivel estático en la mayoría de los pozos medidos no superaba los 10 m (desde el nivel del suelo), como era de esperar para esta temporada, esto se muestra en la Fig. 4.

En la parte baja de la subcuenca en la cual se encuentra la ciudad de Penonomé, se localizan 17 de los 19 pozos monitoreados, en los que se pudo observar que el promedio de la profundidad al nivel estático en estos pozos era de aproximadamente 9 metros, esta medida se tomó desde el nivel del suelo. Esto puede deberse a que la agencia regional del IDAAN en Penonomé, ha optado por rehabilitar algunos pozos e interconectarlos a la red de abastecimiento de agua potable, algunos de los cuales se encuentran cercanos a los pozos de monitoreo y por lo cual se puede asumir que están afectando los niveles estáticos en los mismos. En comparación, en la parte media de la subcuenca se localizaron 2 de los 19 pozos monitoreados, donde la profundidad al nivel estático no superó los 7 metros lo que puede deberse a que, en esta área, se dan lluvias más frecuentes durante la temporada seca, lo que permite mantener un nivel más cercano a la superficie del terreno natural. En la Fig. 5 se muestra la precipitación promedio para el área de estudio.

B. Dirección de flujo de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas se mueven en el subsuelo a velocidades menores que las aguas superficiales. Este movimiento depende del tipo de suelo. Usualmente siguen el relieve de la superficie terrestre, es decir se mueven desde las zonas de recarga hacia las zonas de descarga. Estas pueden recorrer largas distancia a través del subsuelo.

Las líneas equipotenciales obtenidas (Fig. 6) representan curvas que unen puntos con igual potencial hidráulico y, por tanto, representan la altura o cota absoluta de la superficie freática (o de la superficie piezométrica en general). En el área de estudio tienen valores entre los 30 y 160 m. La dirección principal de flujo de aguas subterráneas se identificó a partir de mapas, dibujando líneas de corriente perpendiculares a las cotas de igual nivel piezométrico o isopiezas. En la Fig. 6 se presenta las líneas equipotenciales y disminuyen desde la parte alta de la subcuenca, hasta la parte baja, descargando en los ríos.

C. Caudales

En la TABLA 2 se presenta resultados de caudales en 3 puntos sobre el río Zaratí (Sofre, El Barrero y Paso Ancho) y 2 afluentes (El Salado y Tue), en los meses de agosto 2019 y el mes de enero de 2020.

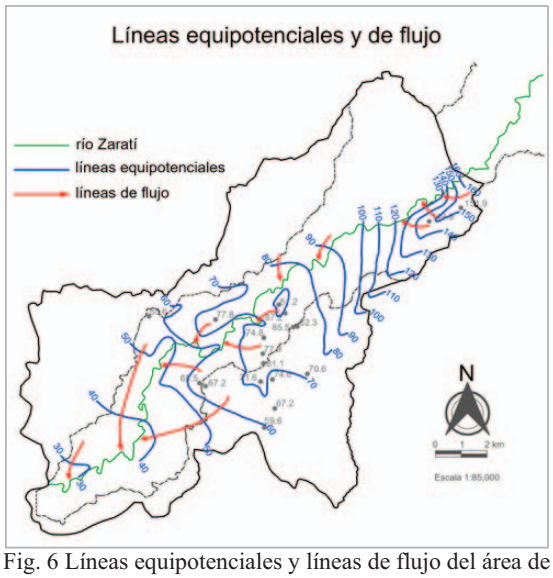


Fig. 6 Líneas equipotenciales y líneas de flujo del área de estudio [6].

TABLA 2 CAUDALES OBTENIDOS EN LOS PUNTOS DE AFORO [6].

Punto de Aforo	Agosto 2019 (m^3/s)	Enero 2020 (m^3/s)
Sofre	1.69	0.51
El Salado	0.08	0.05
Tue	0.20	0.09
El Barrero	2.38	1.12
Paso Ancho	3.74	0.91

Se puede observar, que, durante la temporada seca del año 2020, los ríos disminuyen su caudal por la falta de lluvias durante la misma, pero se pudo observar que el caudal base del río Zaratí se mantiene durante la temporada seca, a lo largo de su trayecto debido al aporte de las aguas subterráneas del acuífero. Esto es una característica de llanuras húmedas e indica que los ríos son puntos de descarga de las aguas subterráneas [5]. Entre el punto de aforo ubicado en El Barrero y el ubicado en Paso Ancho se pudo observar una diferencia de 0.21 m^3/s.

Es importante resaltar que, entre estos dos puntos, está ubicada la toma de la planta potabilizadora de Penonomé que extrae agua del río Zaratí para abastecer de agua potable a comunidades aledañas y al centro de la ciudad de Penonomé, lo que puede estar ocasionando que al llegar a este punto el caudal sea más bajo.

D. Balance hidrico subterráneo.

Para esta investigación se incluyó la estimación del balance hídrico en la subcuenca media-baja del río Zaratí. El balance hídrico es una herramienta indispensable para el planeamiento y manejo del recurso hídrico, es un reflejo de la riqueza hídrica dentro de la zona donde se realiza.

Se presentan los resultados del balance hídrico subterráneo, obtenidos para el período de estudio (enero-febrero 2020), ver TABLA 3.

En la Fig. 7 se muestran los resultados generales del balance hídrico subterráneo para el área de estudio, con la recopilación de los datos ya presentados. Se muestran las entradas y salidas del sistema.

Es importante mencionar que, de acuerdo con un estudio realizado en el 2010, se puede considerar como zona de recarga las partes montañosas superiores a 200 m aproximadamente siempre y cuando la parte montañosa sea masiva excluyendo algunas elevaciones aisladas dentro de las llanuras pre montañosas [7]. En la parte alta del área de estudio, se puede encontrar elevaciones entre 180 a 490 m, lo cual pudiera dar indicio que se puede encontrar una zona de recarga en esta área. Esta idea se puede fundamentar con un estudio publicado en 2021, donde se hacen observaciones acerca la parte alta de la subcuenca del río Zaratí, en estas se especifica que los suelos de la parte alta son inceptisoles y entisoles, de texturas más gruesas, mejor estructura y contenido de materia orgánica, para estos se sugirió su protección para recarga acuífera mediante técnicas de conservación de suelos, reforestación y uso recreativo para ecoturismo [5].

TABLA 3 RESUMEN DE RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO PARA LA SUBCUENCA MEDIA-BAJA DEL RÍO ZARATÍ [6].

	Resultados en (m^3)	Enero-febrero 2020
	$\Delta V_{acuífero}$	-1.74 x 10^7
Entrada	R	49213
Salidas	ΔV_{pozos}	94640
	$\Delta V_{río-acuífero}$	24192
$\Delta V_{frontera-acuífero}$		**-1.73 x 10^7**

El volumen de intercambio entre la frontera del área de estudio y el acuífero subyacente utilizando la ecuación (10) da un resultado de $\Delta V_{frontera-acuífero}$ = -1.73 x 10^7 m^3. Este resultado permite conocer que, durante el tiempo evaluado, se está dando un intercambio de salida a través de la frontera, y que el acuífero está perdiendo agua a través de esta. Se estimó que este volumen de intercambio puede estar siguiendo las direcciones de las líneas de flujo del agua subterránea que vienen de la parte media, recorriendo toda el área baja de Penonomé hasta llegar a la frontera sur, que se delimitó para el área de estudio.

IV. CONCLUSIÓN

Se realizó un balance hídrico subterráneo en la parte medio y baja de la subcuenca del río Zaratí para evaluar la dinámica del comportamiento entre las aguas superficiales y subterráneas. El río Zaratí es la principal fuente de agua del área. En el río Zaratí se encuentra la toma de la planta potabilizadora Efraín Meneses la cual suple de agua potable a la ciudad de Penonomé. Adicional, algunas comunidades se abastecen de agua proveniente de pozos. Es importante mencionar que recientemente las instituciones a cargo de los servicios de agua potable se han visto en la necesidad de rehabilitar pozos inactivos en el área para poder satisfacer la demanda de agua de la ciudad de Penonomé y sus alrededores. Esto debido al crecimiento urbano, y en actividades agrícolas, aunado a la disminución del recurso

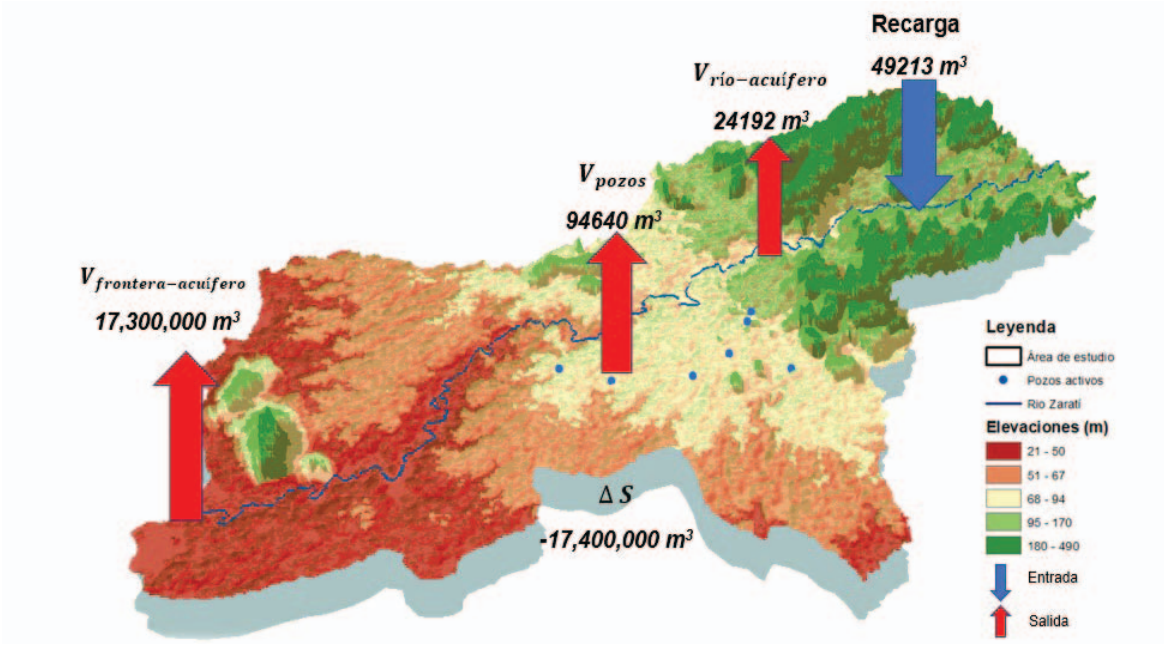


Fig. 7 Modelo conceptual de balance hídrico en el área de estudio [6].

hídrico disponible por efectos del cambio climático, en particular durante la temporada seca.

Según la investigación realizada se concluye que existe un intercambio de volumen en la frontera sur, es decir, este puede estar siguiendo las direcciones de las líneas de flujo del agua subterránea que vienen de la parte media, recorriendo toda el área baja de Penonomé hasta llegar a la frontera sur donde sale hacia el área limítrofe. Adicional, cuando se analizaron los componentes del balance hídrico subterráneo, los cuales son valores estimados basados en el procesamiento de los datos propios del área de estudio, se observó que durante este período la entrada es menor que las salidas. Considerando que el análisis fue hecho en temporada seca, es probable que este comportamiento sea consecuencia de la gran cantidad de pozos activos que se requieren para complementar el servicio de agua potable dentro del área de estudio. Es relevante mencionar que esto es un estudio preliminar que se debe realizar en un período más prolongado para realizar conclusiones más concretas. Puesto que, debido a las restricciones de movilidad durante la pandemia del COVID-19, declarada en la Republica de Panamá en marzo de 2020, la recolección de datos en campo fue suspendida.

Esta investigación se convierte en una herramienta para la toma de decisiones de medidas necesarias para la gestión del recurso hídrico del área, su administración en la actualidad y para generaciones futuras.

REFERENCIAS

[1] Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, «Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos.», Panamá, nov. 2016. doi: 10.29327/15276.1-3.

[2] Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA), «Datos históricos de lluvia, estación Sonadora», 2021. https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos.

[3] CATHALAC y MIAMBIENTE, «Informe Final de Consultoría. Estado actual de la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas de los ríos La Villa (128), Santa María (132) y Grande (134).», Panamá, ene. 2018.

[4] K. Márquez y C. Carranza, «Determinación de la variación espacial de las tasas de infiltración en los suelos de la subcuenca del río Zaratí», Universidad Tecnológica de Panamá, 2021.

[5] J. Castrellón, M.G., Muñoz, M., Guerra-Chanis, G., Leiva, J.A., Flogia, L. y Fábrega, «Las aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá : Un tesoro por explorar», n.º APANAC, p. 113.119, 2021.

[6] E. Sánchez y M. Lorenzo, «Modelo hidrogeológico conceptual de la subcuenca del río Zaratí», Universidad Tecnologica de Panamá, 2021.

[7] Nómadas de Centroamérica, «"Delimitación de acuíferos y establecimiento de zonas de recarga, para identificar su vulnerabilidad y el desarrollo de una estrategia para su protección y conservación en el Arco Seco del país"», 2010.

[8] G. E. Gordon . y L. A. Ramos O., «Modelo hidrogeológico conceptual de la subcuenca baja del río Zaratí.», Universidad Tecnológica de Panmá, Panamá, 2017.

Proposal to Improve productivity in the energy suspension process in Compañía Energética, with the DMAIC Methodology

Propuesta para mejorar la productividad en el proceso de suspensión de energía en Compañía Energética, con la Metodología DMAIC

Ingrid Milena Fernández
Departamento de Ingeniería
Fundación Universitaria de Popayán
Popayán, Colombia
ingrid.fernandez@docente.fup.edu,co

Jully Andrea Moreno
Departamento de Ingeniería
Fundación Universitaria de Popayán
Popayán, Colombia
investigacion.industrial@fup.edu,co

Eimy Villareal
Departamento de Ingeniería
Fundación Universitaria de Popayán
Popayán, Colombia
eymikathe@hotmail.com

Sebastián Muñoz
Departamento de Ingeniería
Fundación Universitaria de Popayán
Popayán, Colombia
sebastianmmelendez@gmail.com

Gustavo Paredes
Departamento de Ingeniería
Fundación Universitaria de Popayán
Popayán, Colombia
paredespargus@hotmail.com

***Abstract*— This article was carried out in a company that distributes and markets electrical energy to generate a proposal for improvement in the process of cutting and suspending energy. The DMAIC methodology was established by applying its five phases: define, measure, analyze, improve, control; identifying that the productivity indicator of execution of cutting and suspension was 68%, which does not meet the projection and a CP of 0.88 was found, which is below the adequate capacity for the process. It was analyzed that the main cause of the non-conformities related to the non-compliance with the process is the time that the brigade members spend in the displacement towards the development of their activities since there are no clear routes and a planning that takes into account the distances and proximity. of the points to visit. Three proposals for improvement were proposed: Establish location maps for the routing of activities according to the assignments of each technician, elimination of idle time for technicians by applying The Heijunk operating philosophy, optimization of operation routes.**

Keywords*— DMAIC, Six Sigma, Lean Manufacturing, Process Improvement, Productivity, Energy Company*

***Resumen* — El presente artículo se realizó en una empresa que distribuye y comercializa energía eléctrica para generar una propuesta de mejora en el proceso de corte y suspensión de energía. Se estableció la metodología DMAIC aplicando sus cinco fases: definir, medir, analizar, mejorar, controlar; identificando que el indicador de productividad de ejecución de corte y suspensión en fue del 68%, el cual no cumple con lo proyectado y se encontró un CP de 0.88 que se encuentra por debajo de la capacidad adecuada para el proceso. Se analizó que la principal causa de las no conformidades relacionadas con el incumplimiento del proceso es el tiempo que gastan los brigadistas en el desplazamiento hacia el desarrollo de sus actividades ya que no existen rutas claras y una planificación que tenga en cuenta las distancias y la cercanía de los puntos a visitar.**
Se plantearon 3 propuestas de mejora: Establecer mapas de ubicación para el enrutamiento de las actividades según las asignaciones de cada técnico, eliminación del tiempo ocioso de los técnicos aplicando la filosofía de funcionamiento Heijunka, optimizar las rutas de operación.

Palabras claves — DMAIC, Seis Sigma, Manufactura Esbelta, Mejora de Procesos, Productividad, Compañía Energética

I. Introducción

Lean Six Sigma es una herramienta utilizada por empresas destacadas a nivel mundial, siendo una metodología que brinda oportunidad de mejora continua y reducción de costes, orientada a la satisfacción de los clientes la cual sirve como estrategia de aplicación utilizando herramientas estadísticas [1]. Dentro de los factores importantes que llevan a una empresa a crecer económicamente se destaca la mejora continua a sus procesos, la cual debe suscitar a que los fallos por perdida de operatividad, condiciones de trabajo o perdida de recursos se reduzcan paulatinamente [2], para esto se pueden utilizar múltiples herramientas que permiten a los trabajadores solucionar problemas buscando la optimización de los recursos y el desarrollo de nuevas alternativas que logran mejorar los procesos, productos o servicios de las empresas,

La estructura DMAIC es el proceso de mejora que utiliza la metodología Seis Sigma y es un modelo que sigue un formato estructurado y disciplinado, la cual consistente en 5 fases conectadas de manera lógica entre sí (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) [3].
La compañía energética es una empresa privada de servicio público dedicada a la distribución y comercialización de energía eléctrica, el problema que presenta la empresa se vincula al proceso de suspensión de energía que se da por el retraso en el cumplimiento de las actividades con respecto al

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00096

tiempo de desplazamiento que se toman los brigadistas en llegar a los puntos que intervienen; para darle solución a este problema se utiliza la metodología Lean Six Sigma, con el fin de encontrar las posibles causas para llevar a cabo el respectivo seguimiento y plantear una propuesta de mejora.

Six sigma y manufactura esbelta son enfoques de mejora de la calidad y productividad que han sido implementados con gran éxito en grandes empresas a nivel mundial [4], diferentes empresas han implementado esta metodología y han adquirido mayor eficiencia en sus procesos; como es el caso de la empresa Servientrega S.A en donde se logra optimizar procesos de importación y exportación haciendo un diagnóstico detallado de cada una de las operaciones, y a través de las herramientas de Lean Manufacturing fue posible modificar los métodos de trabajo para minimizar los tiempos, con el apoyo del personal y de la alta gerencia se aplicaron herramientas Kanban, estrategias de la 5´S y estudios de método y de tiempo, la implementación del Lean Manufacturing mejoro sus actividades evitando sanciones de manejos no admitidos [4]. De la misma forma dentro del uso de herramientas Lean Six Sigma se encuentra la empresa Ferromateriales dedicada a la construcción y que a través de la metodología de DMAIC logro reducir tiempos de entrega analizando y mejorando problemas relacionados con el transporte, tamaños de pedidos, experiencia de los operarios, mal enrutamiento, generando mejoras como ahorro en los costos de los combustibles y retrasos en las entregas a los clientes [5]. La empresa Inversiones CNH enfrento una serie de problemáticas a nivel interno relacionadas principalmente con la desorganización del proceso productivo para lo que utilizaron herramientas Lean Manufacturing con el fin de generar una cultura de trabajo en equipo, disciplina y buenas prácticas que logro disminuir la problemática presentada [6]. Por otro lado, la empresa "El Goloso" dedicada al sector de alimentos realizó una propuesta para reducir el tiempo de ciclo en el proceso de fabricación de almojábanas, para ello se utilizó la metodología Lean Manufacturing donde inicialmente se plantea un diagnóstico de las operaciones, tiempos de producción, búsqueda de mudas y cuellos de botella, se plantearon herramientas como (VSM, Pareto, Ishikawa). Posteriormente se elaboraron propuestas que buscan la reducción de los tiempos de ciclo, con metodologías como: 5's, células de trabajo y SMED. Finalmente se realiza una evaluación de viabilidad económica utilizando indicadores y teniendo en cuenta el capital invertido en la propuesta y los ingresos adicionales adquiridos por la mejora [7].

Para la Compañía Energética es importante establecer la metodología DMAIC debido a la variabilidad que existe en el proceso y que tiene como resultado la baja productividad, con el fin de mejorar la problemática que se presenta en la empresa, se propone diferentes propuestas de mejora dentro de las que están la utilización de la herramienta Heijunka del modelo Lean Manufacturing que propone nivelar la productividad de los brigadistas, con el fin de dar cumplimiento al cronograma establecido por la empresa para la ejecución de actividades en el proceso de corte de energía, generando cultura Lean y procesos de cambio en la organización [9]

II. Planteamiento del problema

La Compañía Energética establece un cronograma de actividades mensuales dentro el proceso de suspensión y corte de energía, según los hallazgos se identifica que el indicador se encuentra en un cumplimiento del 68%, lo cual produce un bajo rendimiento en el cumplimiento de las actividades, por lo que se requiere realizar una mejora en el proceso con el fin de mejorar la productividad.

La fórmula y el cálculo para establecer el indicador se muestra a continuación:

$$Productividad = \frac{Tiempo\ Real}{Tiempo\ Disponible}\ x\ \frac{Actividades\ realizadas}{Actividades\ Planificadas} \quad (1)$$

$$Productividad = \frac{7.2\ horas}{8\ horas}\ x\ \frac{19\ actividaes}{25\ actividades} x\ 100 \quad (2)$$

$$Productividad = 68\ \% \quad (3)$$

El resultado de la ecuación (3) muestra una productividad del 68%, en el análisis registrado con los datos históricos de la empresa. Dentro de los antecedentes que existen para no cumplir con las actividades proyectadas, se establece que hay factores ambientales, humanos y sociales que infieren en resultados y generan resultados no conformes en el cumplimento. Se presenta retrasos considerables en el desplazamiento de los brigadistas en los puntos de corte de la energía, teniendo en cuenta que no son programadas por sectores, por lo que pueden visitar diferentes sectores en el mismo día. El tiempo que cada brigadista o técnico invierte en el desplazamiento y la ubicación del punto que se interviene para la suspensión del servicio es muy importante en el cumplimiento de los puntos de corte diarios, reflejados en el indicador final. Actualmente no existe un ruteo óptimo de asignación según la cantidad de actividades diarias en las diferentes zonas.

Para esto se desea plantear desde la metodología y las herramientas del Six Sigma propuestas de mejora en el enrutamiento de actividades optimizando las asignaciones de cada técnico, al momento salir al campo de ejecución.

III. Metodología

El artículo se desarrolló según las etapas establecidas en la metodología Six Sigma utilizando el proceso DMAIC y métodos estadísticos con el fin de lograr una mejora continua. En la fase Definir se identifica las etapas y actividades del proceso; en Medir se selecciona una o más características críticas, se analiza el proceso, estimando la capacidad del proceso a corto plazo [9], en la fase Analizar se realiza un diagnóstico del problema a partir de la información obtenida en la fase de medición, en Mejorar se plantean las estrategias de mejora, identificando factores se van a controlar para medir el efecto sobre las características críticas y se planifica la mejor forma de llevar a cabo la mejora, la fase Controlar, se documenta el resultado de la mejora, y se diseña herramientas para monitorizar el proceso [8]. Se presentan propuestas de mejora del proceso y se aplica una prueba piloto de 1 mes para la ejecución de una de las propuestas con

el fin de identificar los resultados obtenidos según los cambios realizados.

En la TABLA 1. se establece las etapas y las herramientas utilizadas, según las actividades planteadas para la Compañía Energética teniendo en cuenta cada una de las fases según la metodología DMAIC

TABLA 1. FASES, ACTIVIDADES Y HERRAMIENTAS DE DMAIC EN LA COMPAÑÍA ENERGÉTICA

Fase	Actividades	Herramienta
Definir	Caracterización del proceso Revisión del procedimiento de actividad.	Diagrama de operaciones Diagrama SIPOC Project Charter
Medir	Plan de recolección de datos. Estadísticas. Medición de productividad.	Plantilla recolección de datos Medición de la productividad Medición de tiempos
Analizar	Analizar graficas de control	Histogramas Diagrama causa y efecto 5 porques
Controlar y Mejorar	Creación de planillas lluvias de ideas	Planillas de relación de actividades Mapas de sectores Heijunka

IV. DESARROLLO Y RESULTADOS

Se realizan las etapas de la metodología DMAIC para mejorar la productividad en el servicio de suspensión y corte en la Compañía Energética.

A. DEFINIR

Las actividades de suspensión y corte, en la Compañía Energética inician por la generación de las ordenes de trabajo (OT) expedidas por parte del área de cartera de la compañía, es un listado identificado como universo o base datos en el cual se encuentran todos los usuarios que son candidatos para el corte de la energía básicamente se generan actividades por el incumplimiento del pago de energía o por solicitud propia, esta información llega al área de SCR (Suspensión, Corte y Reconexión) donde el coordinador del área con los supervisores filtra este listado en dos tipos de carteras: 1- Cartera Baja y 2- Cartera Alta, esta última corresponde a usuarios con deuda superior a un millón de pesos los cuales se les da un manejo más efectivo debido a que estos corresponden a servicios industriales y comerciales, estas OT son generadas de forma sistemática por el analista a las TGO (Terminal de Gestión De Orden) a las diferentes brigadas, estas están divididas en dos clases de brigadas; correspondientes a 2 brigadas denominadas “pesadas” que realizan actividad en camionetas y 9 brigadas “livianas” correspondiente al personal que labora en moto.

En la TABLA 2 se muestra el SIPOC del proceso de suspensión de energía, identificando los proveedores, las entradas, las salidas y a que cliente se genera la información del proceso.

TABLA 2. SIPOC PROCESO DE SUSPENSIÓN DE ENERGÍA

SIPOC del Proceso de Suspensión de Energía				
Proveedor	**Entradas**	**Proceso**	**Salida**	**Cliente**
Área de Control de Energía	Reporte de Suspensión	Definir Ordenes de Trabajo	Itinerario de Asignación	Técnico de Corte
Supervisor	Registro de Salida a terreno	Ubicar Usuarios en el terreno	Usuario ubicado	Usuario
Técnico de corte	Aplicativo interno y elementos de Trabajo	Suspensión de Energía	Cliente Suspendido	Usuario
Técnico de Corte	Aplicativo Interno	Cerrar Actividad	Actividad Ejecutada	Centro de Control

En la TABLA 2. se establece el SIPOC del proceso realizado para la suspensión de energía, realizando un análisis con el equipo de se determina que la parte critica del proceso está relacionada con la ubicación de los usuarios en los lugares donde se realiza la suspensión de energía, debido a que el proceso se mide en el tiempo que tardan los brigadistas en el desplazamiento hacia el punto de corte.

TABLA 3. INDICADORES DE EJECUCIÓN PROCESO DE CORTE DE ENERGÍA

Indicador Operativo	Universo	Total Inspecciones	Inspecciones Ejecutadas	Inspecciones no Ejecutadas	Indicador
Ejecución	2581	441	301	140	68.25%
Documentación	2581	441	379	62	85.94%
Actuación					97.47%
Calidad Operativa					83.89%

En la TABLA 3, se establecen los indicadores de la muestra tomada en el periodo de tiempo del presente estudio. El supervisor de la empresa verifica todos los meses el cumplimiento del área, a través de los indicadores se puede observar el cumplimiento que desarrollan los técnicos dentro del proceso. Se analizan tres indicadores, actuación, documentación y ejecución, esta última de los datos tomados el 68% fueron ejecutadas y el 32 % que no se cumplió. se determinó la causa principal para el no cumplimiento del 100 % del indicador fue el mal enrutamiento dentro de itinerario de asignación de los brigadistas.

Para dar un concepto mas claro del proceso que se lleva a cabo se utilizó la herramienta project charter, con el fin de delimitar el alcance, objetivos, y determinar datos relevantes del proyecto generando como resultado lo siguiente:

- Descripción del problema: El problema encontrado en el proceso de suspensión de energia, esta relacionado con el tiempo de desplazamiento que toman los brigadistas hacia el punto de corte lo cual genera baja productividad, costo adicional para la entidad e incumplimiento con el usuario.
- Objetivo del proyecto: Proponer una mejora de la productividad en el proceso de suspensión en la compañía energética de occidente, con el método DMAIC.
- Beneficios: Aumentar el porcentaje de eficiencia y satisfacción del cliente aumento baja productividad en el proceso de suspensión de energía desplazamiento hacia el punto de corte.

B. MEDIR

Se realizó un plan de recolección de datos con el fin de analizar la baja productividad del proceso. En este proceso intervienen 10 técnicos distribuidos 2 clases de brigadas; livianas y pesadas estas desarrollan las funciones de suspensión.

La primera variable que se midió en este proyecto fue el desplazamiento. Para eso se implementó una planilla de relación de actividades, en el cual se diligenciaron los datos desde el momento en que se da autorización de salida de la oficina, diligenciando la hora. Esto se realizó para todas Ordenes de Trabajo (OT) que fueron realizadas, al final se hace una sumatoria del tiempo total del desplazamiento.

TABLA 4. RECOLECCIÓN DE DATOS POR OT

Toma de Tiempos de Desplazamiento Diario		Tiempo de desplazamiento Minutos	Tiempo de desplazamiento en horas	% de tiempo
Tiempo de la actividad - Tiempo de Almuerzo (432 minutos)				
Duración Actividad (20 Minutos)	**Minutos**			
Técnico 1	296	136	2.3	31%
Técnico 2	336	96	1.6	22%
Técnico 3	244	188	3.1	44%
Técnico 4	308	124	2.1	29%
Técnico 5	348	84	1.4	19%
Técnico 6	304	128	2.1	30%
Técnico 7	328	104	1.7	24%
Técnico 8	280	152	2.5	35%
Técnico 9	288	144	2.4	33%
Técnico 10	324	108	1.8	25%

Según los datos relacionados en la TABLA 4, se calcula los tiempos de desplazamiento analizando los 5 primeros días de asignación del mes, con un tiempo de actividad de 20 minutos por actividad aproximada y por el número de ejecuciones se obtiene el tiempo total de ejecución de todas las actividades, del total de minutos diarios se obtiene la cantidad en tiempo de desplazamiento, se observó que la inversión en transporte es muy significante debido a las distancias que hay de un punto a otro.

A partir de los datos que se obtiene del sistema de información se miden el desempeño de los trabajadores en relación al total asignadas con respecto al total ejecutada y se obtiene en porcentaje un indicador de productividad.

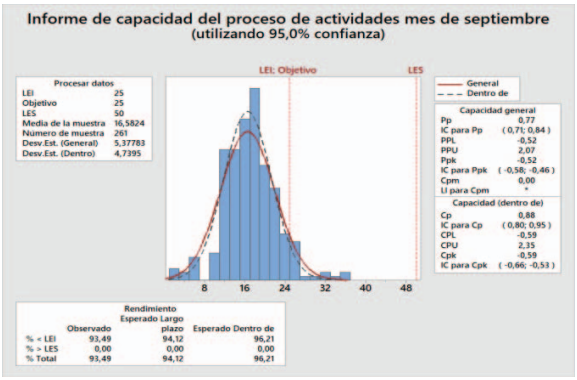


Fig. 1. Histograma de Capacidad del Proceso mes de muestra

La Fig I. muestra una gráfica con distribución no normal con un CP: 0,88 por debajo de la capacidad adecuada y demostrando que el proceso necesita modificaciones serias para alcanzar la capacidad.

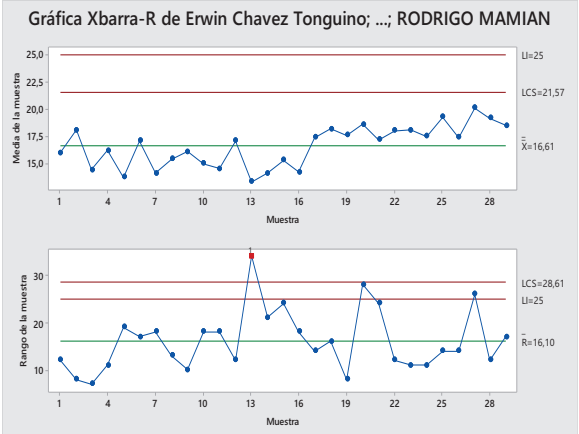


Fig. 2.Grafica de control X-R

La Fig. 2, muestra una gráfica de variabilidad normal que no está controlada con demasiados sesgos por debajo del límite inferior. Hay una tendencia a que los operarios realicen 16 actividades diarias muy por debajo del límite inferior; también se observa que hay puntos especiales que superan el límite inferior, estos puntos son favorables por que se están ejecutando más actividades de lo programado. Se encuentra que hay operarios con cumplimientos muy bajos, para lo cual se hizo un análisis a este aspecto, encontrando que hay actividades que se desarrollan en zonas rurales muy dispersas.

C. ANALIZAR

En esta fase para el análisis de la problemática se utilizó un diagrama causa y efecto, los 5 porques y diagrama de Pareto. Para esto se toman los datos del mes muestra.

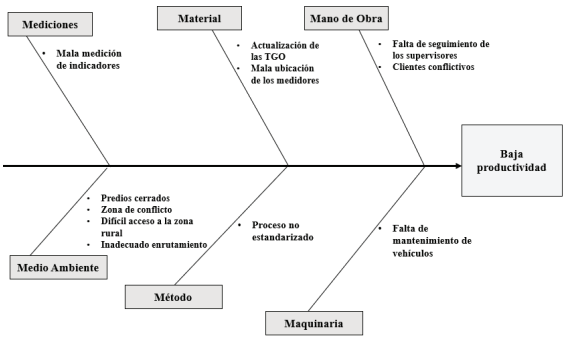


Fig. 3.Diagrama Causa- Efecto Proceso de suspensión de energía

La Fig. 3 establece el diagrama causa y efecto en el proceso de suspensión y corte de energía en la compañía, el análisis determina que el factor que mayor incide en los resultados es el medio ambiente ya que el mal enrutamiento, genera tiempos muertos en los desplazamientos, que se reflejan en baja productividad.

El mayor impacto que tiene la productividad baja es el relacionado con un mal enrutamiento de los puntos donde

deben ir los técnicos a realizar el servicio, puesto que de este depende los tiempos muertos que generan los desplazamientos, se determina que en las zonas que tienen el mayor volumen de candidatos para realizar el corte, los microtiempos no deberían afectar la cifra o cantidad de actividades ejecutadas, pero si se prolongan los desplazamientos estos afectan directamente la productividad operativa en campo, los micro tiempos van directamente proporcionados a la productividad, por cada 5 minutos que se pierdan en una actividad o un desplazamientos se dejan de ejecutan el 50% de una actividad así que en 12 OT con pérdida de tiempos hasta de 5 minutos se dejaría de ejecutar al menos 6 actividades de suspensión del servicio, lo equivalente a 1 hora perdida o tiempo muerto.

Teniendo en cuenta que el método de suspensión se encuentra estandarizado y no requiere implementar mejoras debido a que esta actividad comprende tiempos en el desarrollo de protocolos de calidad y seguridad los cuales son necesarios mantener, por lo tanto, las causas que se observan en la baja productividad se ven presentadas en las asignaciones y en el enrutamiento de la OT, esta problemática se incrementa más en la zona rural dado que la labor es afectada por los largos desplazamientos.

TABLA 5. METODOLOGÍA 5 PORQUÉS PARA LA COMPAÑÍA ENERGÉTICA

PREGUNTAS	***RESPUESTAS***
¿Por qué no se cumple con el indicador establecido en el proceso de suspensión y corte en la empresa?	porqué hay baja productividad de actividades ejecutadas en la zona rural
¿Por qué hay baja productividad de ejecución rural en el área de suspensión y corte?	Por falta de estandarización de las actividades del proceso.
¿Por qué no hay estandarización en el proceso?	Porqué existen aspectos externos como; medio ambiente y desplazamiento hacia los diferentes puntos
¿Por qué aspectos de medio ambiente influyen en la estandarización del proceso?	Porqué las condiciones externas como: vías en mal estado, el clima, los predios cerrados, control de animales (perros bravos) y zona en conflicto y una buena distribución de actividades.
¿Por qué no hay una buena distribución de actividades	Porqué no existe un buen ruteo de las actividades con un cronograma previo bien establecido.

La TABLA 5, muestra la aplicación de la metodologia de 5 Por qués, utilizada como un metodo interrogativo para encontrar la raiz de un problema. Dentro del análisis realizado con los jefes de procesos dentro de la empresa se encuentra que la causa raíz es la falta de planeación en las rutas según los requerimientos existentes y el cronograma de actividades establecido.

Al identificar la causa raíz del problema**,** **s**e realiza un muestreo georefenciado, con el propósito de evidenciar el tiempo de desplazamiento de los brigadistas hacia los puntos de corte, dando a conocer la baja productividad en el cumplimiento de las actividades; dando como resultado la identificación del límite de actividades que se cumplió por los técnicos.

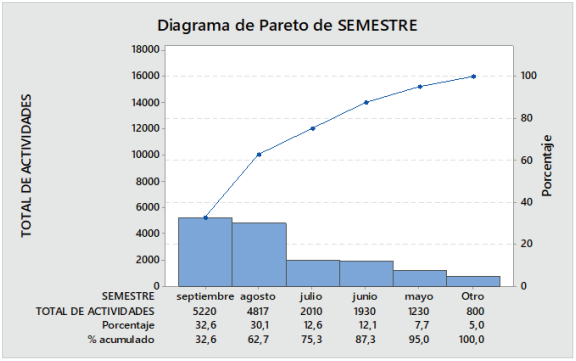


Fig. 4. Diagrama de Pareto de las actividades de los Técnicos en un periodo de 6 meses.

La Fig.4 establece datos en los que en los meses de agosto y septiembre el porcentaje del acumulado es del 62% con respecto al 33% de los datos de las actividades que se realizaron hasta la fecha, demostrando que los dos últimos meses se observa que existe una tendencia y generan mayor prioridad debido a que integra mayor número de actividades en los últimos 6 meses.

D. CONTROLAR Y MEJORAR

Según el analisis y la conclusión el cual es mal enrutamiento de los técnicos, que afecta la cantidad de actividades ejecutadas en un día. Se recurre a establecer mejoras para fortalecer la productividad.

A continuación, se dan a conocer las diferentes alternativas tendientes a mejorar la productividad, cabe resaltar que se tuvo en cuenta en la participación de los técnicos en una sesión de lluvias de ideas.

- Propuesta 1, establecer rutas de mapeo: por medio de la gestión que se hace al proceso de lectura y reparto, los cuales son los encargados de visitar periódicamente a los usuarios en su totalidad en el sector rural en la zona centro, solicitar una copia de los usuarios que están inscritos a la base de datos de la empresa con su respectiva identificación de ruta para conocer el camino más adecuado debido a que actual mente lo técnicos se están apoyando en los puntos GPS y las TGO (terminal de gestión de operaciones) no dan con la ubicación precisa. En esta propuesta se requiere de una solicitud precisa con la base de datos de todos los operarios y las rutas que deben seguir con sus especificaciones, organizando las distancias y optimizando los tiempos, esta solicitud no genera costo para la empresa y lo realiza el coordinador del área de suspensión.
- Propuesta 2, eliminación del tiempo ocioso del técnico de suspensión: el objetivo de esta propuesta es asegurar que el técnico de suspensión permanezca realizando actividades que agreguen valor en el proceso.

La herramienta se basa en el diseño e implementación de una planilla de relación de actividades bajo la filosofía de funcionamiento de la caja de Heijunka; el concepto de Heijunka, es controlar la variabilidad de la secuencia de llegada del trabajo para permitir una mayor utilización de la capacidad [12], es una de las técnicas importantes más importantes del Lean Manufacturing la idea de esta herramienta es pode nivelar los tiempos de transporte de un usuario a otro dentro de la Compañía Energética, con el fin de poder lograr Trabajar al ritmo del Takt Time, lo cual requiere de un esfuerzo considerable ante las variaciones, eliminar las causas de ineficiencias también poder eliminar tiempos de procesos logísticos.

Para el desarrollo de esta propuesta se debe contar con un profesional encargado para capacitar al personal acerca de la gestión de tiempos, e implementar formatos o planillas que cumplan con lo establecido bajo la filosofía de la caja Heijunka, el responsable del contrato es el coordinador del área de suspensión, lo cual tendría un costo adicional para la empresa.

- Propuesta 3, optimizar las rutas de operación: para atacar la causa principal que es el mal ruteo se puede implementar métodos de barrido aplicados en rutas que no tengan una conexión definida, la idea se basa en la generación de un conjunto de puntos donde se debe intervenir, luego se fijan las distancias mínimas para el recorrido. Esta práctica se trata de extender una línea recta con origen desde el hangar de operaciones de la Compañía en cualquier dirección, después rota la línea en el sentido a las manecillas del reloj hasta que se intercepte cada uno de los puntos, si alguno de los puntos excede la capacidad de la distancia del técnico no incluir este punto y así poder asociar un punto con otro. En esta propuesta se requiere de la contratación externa de personal encargado de manejar el programa para implementar un sistema de ruteo en la empresa, encargado de contratación coordinador del área.

Se realiza una prueba piloto inicial aplicando la propuesta 1, que no genera costos adicionales en la empresa logrando subir el indicador de cumplimiento de actividades a 75% en un mes de prueba.

V. Conclusiones

- En este trabajo se aplicó la metodología DMAIC utilizando herramientas estadísticas organizacionales en las que se pudo identificar los problemas que afectan la productividad en el proceso de suspensión y corte de energía en la Compañía Energética obteniendo un CP de 0.88 por debajo de la capacidad adecuada para el proceso, dentro de las causas que inciden directamente dentro de los indicadores de ejecución se encuentra el mal enrutamiento de los técnicos al realizar las actividades programadas en los distintos puntos de corte.
- De acuerdo con la investigación en la Compañía Energética, se identificó un problema de baja productividad con las herramientas de diagrama de causa y efecto, 5 porqués y diagrama de Pareto para así analizar las posibles causas del problema; con esto se realiza un análisis y se generan 3 propuestas de mejora. Se aplica inicialmente una prueba piloto encaminada a organizar las distancias y optimizar el tiempo que gastan los técnicos en los desplazamientos para realizar los servicios asignados, en un mes de prueba se logró aumentar el indicador de ejecución de 68% a 75% de acuerdo a los servicios generados.
- La metodología Lean-Six Sigma, permitió identificar diferentes oportunidades de mejora que tiene el proceso de corte y suspensión de energía en la compañía, con el fin de buscar nuevas posibilidades de mejorar y afianzar los procesos internos, de manera que se pueda aumentar la productividad y la satisfacción de los clientes.

VI. Referencias

[1] M. Uluskan, *Design of Experiments Based Six Sigma DMAIC Application: Electrostatic Powder Coating Process,* Ankara: IEEE, 2019, pp. 11-23.

[2] M. Carrillo, C. Alvis, Y. Mendoza y H. Cohen, «Lean manufacturing: 5 s y TPM, herramientas de mejora de la calidad. Caso empresa metalmecánica en Cartagena, Colombia,» *SIGNOS- Investigación en sistemas de gestión,* vol. 11, nº 1, pp. 71-86, 2019.

[3] J. Ocampo y A. Pavón, «Integrando la Metodologia DMAIC de Seis Sigma con la Simulacion de Eventos Discretos en Flexsim,» de *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* , Ciudad de Panamá, 2012.

[4] H. Jimenez y A. Carmenza, «Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería,* vol. 22, nº 2, pp. 263-277, 2014.

[5] M. F. Valdez, *Propuesta de implementación del Lean Manufacturing para la optimización de los Sistemas Logísticos en la Empresa Servientrega Internacional,* Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2012.

[6] J. Carmona y R. Jenifer, *Proyecto Lean de Reduccion de tiempos en la Entrega de Pedidos en la Empresa Ferromateriales LA 54,* Santiago de Cali: Universidad San Buenaventura Seccional Cali, 2015.

[7] J. Silva, *Propuesta para la implementaciónde técnicas de mejoramiento basadas en la Filosofia Lean Manufacturing,para incrementar la productivividad para el proceso de produccion de suelas para zapato en la empresa Inversiones CNH S.A.S.,* Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2013.

[8] N. Umba y D. Jesus, *Propuesta para implementar Herramientas Lean Manufacturing para la reducción*

del tiempo de ciclo en la Fábrica de Almojábanas el Goloso, Bogotá: Universidad de la Salle, 2017.

[9] R. Mascarenhasa, R. Mascarenhasa y M. Rosa, «The way lean starts – a different approach to introduce lean culture and changing process with people's involvement,» *Procedia Manufacturing,* nº 38, pp. 248-256, 2019.

[10] O. L. Mantilla y S. J. Manuel, «Modelo tecnólogico para el desarrollo de proyectos logísticos usando Lean Six Sigma,» *Estudios Gerenciales ,* vol. 28, nº 124, pp. 23-43, 2012.

[11] H. Gutiérrez y R. De la Vará, Control Estadistico de Calidad y Seis Sigma, México,D.F: McGraw Hill, 2008.

[12] A. Hüttmeir, S. Treville, A. Ackere, L. Monnier y J. Prenninge, «Trading off between heijunka and just-in-sequence,» *International Journal of Production Economics,* vol. 118, nº 2, pp. 501-507, 2009.

Possibilities of the Use of Electricity for the Substitution of Liquefied Petroleum Gas (LPG) for Cooking Food in the Republic of Panama

Posibilidades del Uso de la Electricidad por la Sustitución del Gas Licuado de Petróleo (GLP) para la Cocción de Alimentos en la República de Panamá

Esaú Saenz
Facultad de Ing. Eléctrica,
Universidad Tecnológica de Panamá,
Panamá, Panamá
esau.saenz@utp.ac.pa

Jessica Guevara-Cedeño
Facultad de Ing. Eléctrica,
Universidad Tecnológica de Panamá,
Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT AIP), Panamá
Panamá, Panamá
jessica.guevara@utp.ac.pa
https://orcid.org/0000-0002-7273-6848

***Abstract* — This work presents an analysis of the use of energy for cooking food in Panama, with the objective of forecasting the consumption of electrical energy by the year 2050 when a plan to replace liquefied petroleum gas with electricity is implemented. Panama is highly dependent on oil derivatives, which makes it vulnerable to the volatility of fuel prices in the international market, so the state must subsidize the 25-pound LPG cylinder. It is considered that families that depend on solid fuels such as firewood will have access to electricity for cooking, thus reducing polluting gas emissions and making rational and efficient use of available resources. The analysis and projection of different data is shown both on the supply side and on the demand side. The results for the scenarios under study are presented: Business as Usual, where the trend of consumption to the year 2050 is studied; and the green scenario where the share of electricity for cooking food in the residential sector increases. In both scenarios, the estimation of the main global warming gases emitted by the use of fuels for cooking is projected. The results show the potential decrease in state spending on the LPG subsidy.**

Keywords— clean cooking, electric energy, energy efficiency, Panama, fuel.

***Resumen* — Este trabajo presenta un análisis del uso de energéticos para cocción de alimentos en Panamá, con el objetivo de pronosticar el consumo de energía eléctrica al año 2050 cuando se implemente un plan de sustitución de gas licuado de petróleo por electricidad. Panamá tiene una alta dependencia de derivados del petróleo lo que la hace vulnerable a la volatilidad de precios de los combustibles en el mercado internacional por lo que el estado debe subsidiar el cilindro de GLP de 25 libras. Se considera que las familias que dependen de combustibles sólidos como la leña tendrán acceso a electricidad para cocción, disminuyendo así las emisiones de gases contaminantes y haciendo uso racional y eficiente de los recursos disponibles. Se muestra el análisis y proyección de distintos datos tanto por el lado de la oferta, como del de la demanda. Se presentan los resultados para los escenarios en estudio: Business as Usual, en donde se estudia la tendencia del consumo al año 2050; y el escenario verde en donde aumenta la participación de la electricidad para la cocción de alimentos en el sector residencial. En ambos escenarios se proyecta la estimación de los principales gases de calentamiento global emitidos por el uso de combustibles para cocción. Los resultados demuestran la disminución potencial en el gasto estatal en el subsidio al GLP.**

Palabras claves — cocción limpia, energía eléctrica, eficiencia energética, Panamá, combustible.

I. Introducción

Los datos históricos del consumo de GLP en Panamá muestran una tendencia creciente del consumo de este energético [1]. En Panamá se importa el 100% de la demanda de GLP para el consumo de los diferentes sectores energéticos, en especial del sector residencial [2].

Panamá es un mercado importante para la transición energética y adopción de nuevas fuentes de energía si se quiere lograr el ODS 7 en América Latina [3]. El subsidio al GLP está fomentando el apilamiento (uso en paralelo de varios combustibles) y la falta de energía eléctrica en la mayoría de las áreas rurales hace que la cocción eléctrica sea inaccesible [4]- [5].

La contaminación producto del humo de estufas improvisadas ha sido desde hace décadas un problema tanto de calidad de energía como de salud en muchos hogares [6] [7]. Desde la COP21 de París el sector de cocción ha dado grandes avances hacia la reducción de las emisiones, sin embargo, en muchos países como el nuestro aún está pendiente establecer una estrategia nacional para ampliar las opciones de cocción limpia [5]- [8].

Cambiar de estufas de combustibles sólidos o estufas de gas a estufas eléctricas es técnica y económicamente viable en la mayoría de los países, pero enfrenta barreras culturales debido a las preferencias de los hogares, los costos y la organización de las cadenas de suministro y las políticas de cada país [9].

En los últimos años tanto académicos, como organismos internacionales de financiamiento y hacedores de políticas públicas han visto que es necesario realizar esfuerzos para reducir las emisiones de gases contaminantes que son las principales fuentes que causan el cambio climático provocado

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00097

por actividades antropogénicas tan complejas como producción de cemento y materiales de construcción, actividades que demanda mucha energía como el transporte de personas y mercancías, o de confort como la climatización, hasta actividades tan básicas como la cocción de alimentos [10] [11].

Esto ha hecho que tanto el sector público como privado, apoyados por organismos de financiamiento unan esfuerzos para formular, apoyar e implementar políticas y programas que lleven a la sociedad en general a ser conscientes de que es necesario un cambio de sistema de producción y consumo que sea sostenible para el medio ambiente del planeta y la salud de las personas [12]. La cocción de alimentos no escapa de esas actividades que tienen un impacto en la calidad de vida de los hogares y que son del alcance de diversas instituciones dentro del País [13].

Este estudio está enfocado en ofrecer una perspectiva para promover el uso racional de los recursos, tanto energéticos como económicos del sector, ya que si bien es cierto por un lado se tienen subsidios para el uso del Gas Licuado de Petróleo en el sector residencial, por otro lado existen familias que aún dependen de la leña para cocinar los alimento, ya que no tienen acceso al uso de GLP ni de electricidad en sus hogares, a pesar de que se han destinado cientos de millones de dólares en subsidios tanto para el uso de la electricidad como para la compra del cilindro de 25 libras de GLP [14].

II. Planteamiento del Problema

A. Antecedentes

En Panamá existen más de 90,000 familias que no tienen acceso a electricidad y energías limpias para cocinar alimentos, Panamá en 2017 tenía 90% de acceso a electricidad y 93% de acceso a energía y tecnologías de cocción modernas [2]. Un posible cambio de equipos de cocción que utilizan gas por equipos eléctricos involucra un análisis estadístico cuantitativo del probable consumo de energía y potencia que estas últimas requieren [15].

Como hipótesis, asumimos que el consumo de energía eléctrica del sector residencial aumente, así como también se espera que al realizar la sustitución hacia estufas que utilicen electricidad la demanda de potencia sea mayor que la actual.

Existe la posibilidad de que el requerimiento de potencia de las estufas inducción pueda coincidir con el de la hora pico, lo cual podría crear perturbaciones en las redes de distribución eléctrica, haciendo necesaria la adecuación de los centros de transformación en la red eléctrica.

B. Descripción del problema

El uso de energéticos ineficientes como la leña y dependiente de importaciones internacionales como el Gas Licuado de Petróleo, es un problema que afecta a las familias de menos recursos y al gobierno. La utilización del Gas Licuado de Petróleo se traduce en un gasto de dinero para el gobierno nacional, ya que este energético se encuentra subsidiado y en la práctica este subsidio no está realmente focalizado hacia los hogares que lo necesitan realmente, lo que provoca gastos innecesarios para el Estado por la indebida utilización de este combustible, además es un combustible que se debe importar, ya que Panamá no es productor de petróleo, por lo que la seguridad energética se encuentra dependiente de factores externos [16] [17]. Con la leña se tiene un problema de salud pública, ya que su utilización como combustible primario no solo indica pobreza energética, si no que causa graves afectaciones a la salud de las familias que la utilizan diariamente.

En teoría el subsidio al GLP se estableció para ayudar a las familias de bajos recursos a acceder a combustibles limpios, sin embargo, a casi 3 décadas de tenerlo, la realidad es otra, han surgido algunos problemas: 1.) Alto costo fiscal; 2.) Contrabando; 3.) Ilusión de bajo precio; 4.) Uso del energético en otras actividades u otros sectores.

C. Justificación

El uso de energéticos limpios para cocinar los alimentos es esencial para el ser humano, sin embargo, aún existe un número importante de hogares en panamá y el mundo que utilizan combustibles contaminantes para el medio ambiente y nocivos para la salud para realizar esta actividad [18]. Lo primero que hay que reconocer es que existe una problemática que no permite acceder a una energía asequible y no contaminante, y esto aún es una realidad para muchas comunidades en Panamá. Principalmente en las zonas rurales, las personas dependen de la biomasa (leña, carbón vegetal) para preparar sus comidas diarias, como única alternativa de combustible, quemándola de manera ineficiente y con consecuencias negativas para la salud y el ambiente [19].

Subsidiar el GLP se justifica generalmente cuando su uso es para la cocción de los alimentos en el sector residencial, dado que se trata de un bien de uso intensivo, que puede llegar a demandar una importante porción del ingreso familiar, especialmente en las familias de menos recursos económicos. Con un subsidio, el gobierno busca se incremente el nivel de ingresos de los hogares [20].

Con la implementación de una política de sustitución de energéticos se puede obtener algunos logros:

1.) Reducción del impacto del subsidio frente al alza del precio de paridad de importación.
2.) Disminución del subsidio.
3.) Precio moderado del cilindro.
4.) Focalizar el subsidio.
5.) Uso eficiente de la energía.
6.) Reducción de las emisiones de gases de calentamiento global
7.) Disminuir la carga Presupuestaria.

Si se quiere aumentar el porcentaje de penetración para disminuir las toneladas de GLP a consumir es probable que se requiera algún mecanismo de apoyo financiero para ayudar a los hogares pobres a adquirir estufas eléctricas y particularmente en casos fuera de la red, sería la adopción de tecnologías limpias para eliminar el uso de la leña y la biomasa [9]. Se debe realizar una evaluación cuidadosa de los esquemas de subsidios e incentivos existentes. Según la experiencia de otros países se puede requerir apoyo para desarrollar modelos comerciales alternativos [15].

La asequibilidad de la energía limpia sigue siendo una barrera crítica para el acceso por el lado de la demanda, y muchas veces la falta de financiamiento eleva el costo unitario de los equipos de cocciones eficientes y/o limpios por el lado de la oferta, ya que las empresas no pueden alcanzar la escala o la rentabilidad financiera. Tanto por el lado de la demanda como de la oferta son 2 barreras financieras que se deben abordar. Esta investigación se enfocará en el estudio del sector residencial sin profundizar en otros sectores como el comercial (hoteles, restaurantes) [21].

D. Objetivo general

Analizar los posibles escenarios de sustitución del energético GLP a electricidad para la cocción de alimentos en el sector residencial a través de un estudio técnico, económico, social y ambiental para la cuantificación de las variables requeridas para proponer la base de una política energética por medio de una proyección al año 2050 [22].

III. METODOLOGIA

Se establece una metodología que busca obtener los factores que inciden en el consumo de energéticos en el sector residencial, así como también de los precios del GLP y la electricidad, dentro de los cuales está: la demanda nacional histórica de GLP, precio internacional, y trasporte marítimo. Para el posible cambio de estufas de gas por estufas eléctricas primero es necesario realizar un análisis cuantitativo y cualitativo del potencial consumo de energético para la cocción y de la potencia eléctrica que se requiere [23].

A continuación, en la figura 1 se muestra un diagrama con los pasos de la metodología a implementar.

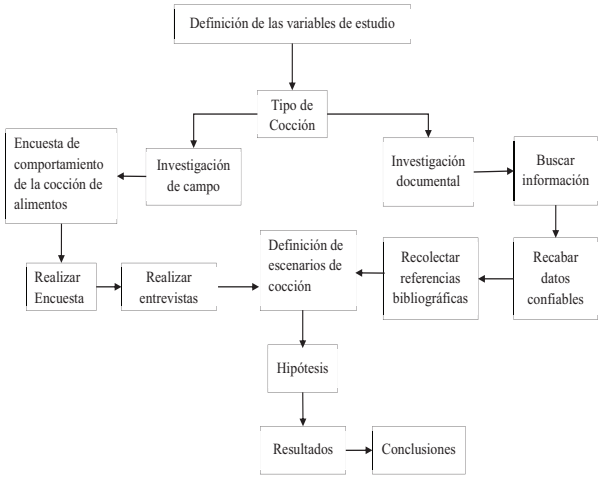


Figura 1. Diagrama de Pasos de la metodología propuesta

A. Etapa Inicial

Desde la perspectiva top-down, recopilación de datos a nivel de políticas e instituciones, se realiza para establecer las principales leyes y políticas relevantes para la cocción en Panamá, se realiza la recopilación y revisión para comprender el estado del marco regulatorio y esfuerzos estatales con respecto a la cocción de alimentos [24].

Para la recopilación de datos a nivel del hogar, bottom-up, como se ampliará más adelante, se realizará utilizando encuestas a una muestra de hogares para obtener información general de cocción, utilización de equipos de la cocina y qué combustible se utiliza para cocinar [24].

- ***Variables de estudio***

- Número de viviendas ocupadas existentes Panamá.
- Número de viviendas que cuentan con acceso a energía eléctrica
- Viviendas que utilizan GLP/Electricidad para cocción de alimentos.
- Ingreso mensual promedio de las familias.
- Densidad de Población por hogar.
- Tipos de cocinas eléctricas de inducción existentes en el mercado doméstico.
- Tarifas eléctricas de distribución.
- Precios históricos del GLP.
- Precios de paridad de importación
- Subsidios a energéticos.
- Regulación aplicable

B. Etapa de investigación de campo

Se elaboró una encuesta que ofrece una idea del comportamiento de las personas para cocinar sus alimentos. La encuesta se estructuró de la siguiente manera: Formulación de preguntas para estimar el horario en que los hogares cocinan sus alimentos y la intensidad con que lo hacen (número de quemadores utilizados, numero de cilindros usados al mes), y en general otras preguntas sobre los hábitos de cocción de alimentos en el hogar para obtener datos que permitan hacer una estimación de los horarios y por lo tanto los requerimientos de potencia y energía necesarias para la preparación de alimentos.

C. Etapa de selección del caso de estudio

Definida la etapa inicial e identificadas las variables del estudio en base a los datos disponibles, se realiza la selección de los casos que se estudiarán:

- **Hipótesis 1: Escenario Gris: Cocción con GLP, Business as usual.**

Este escenario se basa en la hipótesis de que el uso de energéticos en el sector residencial siga tal como hasta ahora. Las decisiones en materia de políticas públicas se tomen tal como se ha hecho siempre. La escasez de recursos petroleros propios de Panamá y la seguridad de la energía son problemas fundamentales. Los gobiernos intentan seguir importando los suministros, lo que provoca que cambios significativos en el uso de los energéticos en la sociedad sean difíciles de realizar.

Dados los resultados de las últimas licitaciones para las contrataciones de energía y potencia realizadas por parte de los encargados de hacer las mismas, el gas natural es una fuente de energía cada vez más importante dentro de la matriz energética a pesar de que el cambio climático es un tema importante dentro de la agenda política.

- **Hipótesis 2: Escenario Verde: Cocción con Electricidad + GLP**

Este escenario está basado en una política energética que depende de tres factores clave: el acceso a combustibles limpios, la necesidad de crecimiento económico y la reducción de las emisiones.

Contar con un sólido crecimiento económico y reducir las emisiones contaminantes no es una tarea fácil, es más, la evidencia muestra que en muchos países industrializados el crecimiento económico fue posible debido a que los problemas medio ambientales se consideraban irrelevantes [25]. Sin embargo, esta situación ha cambiado en los últimos años debido a los esfuerzos de la comunidad internacional por establecer mecanismos de mitigación para el cambio climático [26].

En este caso el gas natural se utiliza como un combustible de transición, lo que ofrece la oportunidad a energías renovables, como la eólica y la solar distribuida para que se desarrollen y puedan reducir sus costos [27]. Cada día más personas tienen la conciencia de la escasez de recursos y una

forma de vida sostenible es necesaria para mantener estable la vida en el planeta.

Un mecanismo para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía y reducir el consumo de hidrocarburos es la eficiencia energética, sumada al desarrollo de otras tecnologías como la movilidad eléctrica y las redes inteligentes [28]. Más adelante en este capítulo se hablará sobre la eficiencia energética.

D. Estadística

La demanda de energía del sector residencial es satisfecha por gas licuado de petróleo, electricidad, leña, carbón vegetal y kerosene principalmente para actividades como iluminación, cocción de alimentos y climatización, el porcentaje de participación se puede observar en la tabla 1, se muestra que el más utilizado es la electricidad y luego por la leña [14].

TABLA 1. ENERGÉTICOS UTILIZADOS EN EL SECTOR RESIDENCIAL. [14]

Sector Residencial					
Energético	Leña	Electricidad	Gas Licuado de Petróleo	Kerosene y turbo	Carbon vegetal
Kbep residencial	1197.4	1894.3	1081	0.3	3.2
% Residencial	28.67%	45.36%	25.88%	0.01%	0.08%

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda, el número total de hogares que usaron GLP en el año 2010, como fuente de energía para cocción de alimentos fue de 762,440, de los cuales se estimó que 639,965 corresponden a las viviendas que utilizan cilindros de 25 Lb de GLP subsidiados por el Estado [29]. El GLP tiene un valor importante dentro del uso final de la energía dentro del sector residencial, en Panamá el subsidio al GLP es generalizado, no está focalizado. El precio de venta del cilindro de 25 libras está fijo en 4,37 dólares desde hace 25 años (1992) [20].

Se asume que el 100% de toneladas de GLP en el sector doméstico se destina para la cocción de alimentos. En la figura 2 se muestra la evolución de las ventas del cilindro de 25 libras de GLP. Se puede ver que han ido en aumento años tras año, pasando de 5.5 millones a cerca de 12 millones de cilindros.

Figura 2. Ventas nacionales de GLP. Fuente: estadísticas-Secretaría Nacional de Energía [30]

IV. ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS

Los casos de estudio que se presentan son sobre la cocción de alimentos en el sector residencial. Por lo tanto, en esta sección se presenta el análisis de los distintos escenarios de proyección del consumo de GLP y electricidad al año 2050 como energéticos para la cocción en los hogares panameños, utilizando diferentes premisas como: acceso de la población a combustibles eficientes gracias a su ubicación geográfica, poder adquisitivo de las familias, precios internacionales del combustible [31].

A. Análisis del Escenario Gris: Cocción con GLP, Business as usual

Actualmente, en Panamá se utiliza el GLP como energético para la cocción dentro del sector residencial, por lo tanto, nuestro punto inicial es la tendencia de mantener el uso de GLP dentro de los hogares panameños, por lo que se observa un crecimiento de 1,506 KBEP de GLP que representan un aumento del 58% con respecto al consumo residencial del año 2019, como se observa en la figura 3.

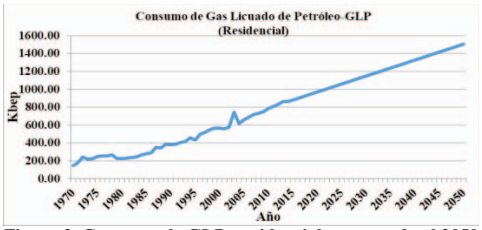


Figura 3. Consumo de GLP, residencial proyectado al 2050

Finalmente, como se ve en la figura 4 para 1,617,481 hogares proyectados en el año 2050 se estima un crecimiento en la demanda de cilindros de GLP de 210 % con respecto a la demanda del año 1998, como se puede observar en la figura 5.

Figura 4. Hogares que usan GLP al 2050.

Figura 5. Cilindros de GLP vendidos.

La proyección final obtenida para la cantidad de cilindro es de 17,403 cilindros de 25 libras lo cual permite calcular en el siguiente punto el monto del subsidio en balboas que se tiene que garantizar para cubrir la demanda en el sector residencial.

Una vez calculado el Precio de Paridad de Importación al año 2050, y asumiendo que el precio regulado del GLP permanece sin variación al mismo horizonte de tiempo, se realiza la proyección del gasto público destinado para el subsidio al GLP, el cual asciende a un valor de 198 millones de dólares en el año 2050, tal como se muestra en la figura 6.

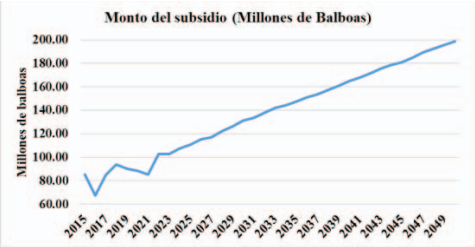


Figura 6. Monto del subsidio

Datos previos nos indican que en el periodo 1998-2020 el costo del subsidio ha sido de 1,285.66 millones de balboas. Previo al año 1998 no se cuenta con estadísticas oficiales [32]. Finalmente, el resultado de la proyección realizada del monto acumulado al 2050 del gasto en subsidio al GLP es de 4,458 millones de balboas. Además, si a ese monto le adicionamos lo ya gastado desde el año 1998 asciende a 5,744.5 millones de balboas que se habrían entregado al sector residencial al año 2050.

B. Análisis del Escenario Verde: Cocción con Electricidad + GLP.

En esta sección se evaluará la sustitución de gas licuado de petróleo por electricidad de forma progresiva para la cocción de alimentos. Para este análisis se utiliza un modelo estándar de una estufa eléctrica de inducción y una estufa eléctrica de resistencia de 4 "quemadores" ambas. Se utiliza una potencia promedio para cada estufa, la estufa de inducción tiene una potencia media de 1,300 W mientras que la eléctrica tiene una demanda media de 1,525 W. En la tabla 2 se muestra la demanda por cada quemador.

TABLA 2 POTENCIA DEMANDADA POR QUEMADOR

Demanda de Potencia por Estufa		
Quemador	**Inducción (W)**	**Eléctrica (W)**
Quemador 1	1,300	1,700
Quemador 2	2,100	2,300
Quemador 3	1,100	1,200
Quemador 4	7,00	900
Promedio	1,300	1,525

La demanda de potencia se calculó en base a la siguiente ecuación (1):

$$P\ (KW) = \left[\left(P_{Q1}\right) * (H) * \left(N_{Q1}\right) * \left(\%_{Q1}\right) + \cdots \left(P_{Qn}\right) * (H_n) * \left(N_{Qn}\right) * \left(\%_{Qn}\right)\right] \quad (1)$$

En donde:

P es la demanda máxima total para una hora.
P_{Qn} es la demanda de un quemador individual.
H_n es el número de usuarios total con acceso a la tecnología.
N_{Qn} es el número de quemadores utilizados.
$\%_{Qn}$ es el porcentaje de usuarios que cocinan sus alimentos en ese momento.

Como se puede ver en la figura 7, en el año 2050, la curva de demanda de potencia tiene tres picos; en el periodo del desayuno, en el del almuerzo y para la cena, estos picos, se presentan en los mismos periodos para los años anteriores al 2050.

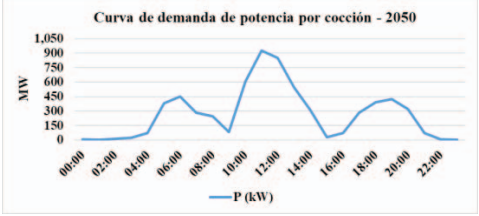


Figura 7. Curva de demanda de potencia por estufas eléctricas al año 2050

Se puede apreciar un considerable aumento en la demanda de potencia al utilizar estufas eléctricas. Como se observa en la figura 7 la demanda máxima ocurre entre las 11 de la mañana y 1 de la tarde, requiriéndose una potencia de 926 MW en el año 2050.

Esto representa un aumento del 2,000% con respecto a la curva de demanda del escenario tendencia si no se introdujeran estufas eléctricas. Los otros picos son entre las 6 de la tarde y las 8 de la noche debido a la preparación de la cena; el pico de la maña se da entre las 5 de la mañana y las 7 de la mañana, estimándose una demanda 450 MW.

En relación con el consumo de energía total, debido al uso de electricidad para cocción, como se muestra en la figura 8, en este escenario se da una disminución del 83 % en el uso de energía fósil proveniente del GLP para cocción con respecto al escenario tendencial al año 2050, se dejarían de utilizar 2,744 000 cilindros de GLP.

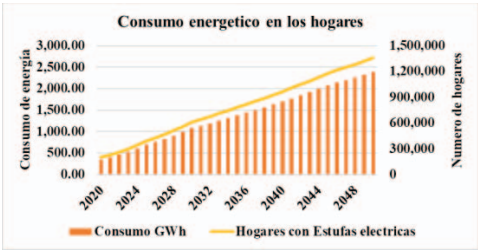


Figura 8. Proyección del consumo de energía por estufas eléctricas

C. Comparación de escenarios

- **Consumo de energía total**

El aumento de energía eléctrica en el escenario verde causado por el reemplazo de GLP por electricidad pasa de ser en el escenario 1 de 13.16 GWh al escenario 2 de 2,388 GWh. A nivel final de energía, esto se traduce en un aumento de 139 Kbep, como se muestra en la tabla 3.

TABLA 3. CONSUMO DE ENERGÍA TOTAL

Energía total			
Escenario	**Cilindros de GLP**	**Total de Energía para cocción (Kbep)**	**Energía (GWh)**
Escenario Gris	17,403,425	1,574	2,563
Escenario Verde	2,807,864	1,713	2,790

En la figura 9 se muestra el total de hogares con acceso a combustibles limpios para cocinar en el escenario verde. Estos incluyen los que utilizan estufas electricas, estufas de

inducción y GLP, como se observa la utilización del GLP va disminuyendo.

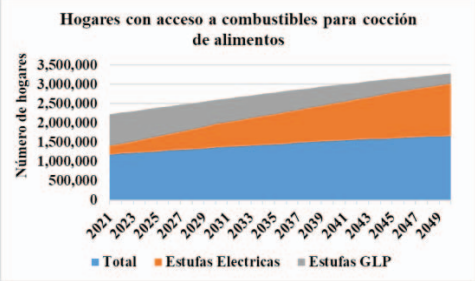


Figura 9. Proyección del consumo de energía por estufas eléctricas

- **Proyección de consumo de GLP y subsidio.**

Como se puede ver en la figura 10, en comparación, el monto del gasto público durante el periodo de análisis para el escenario 1 va creciendo año tras año a medida que aumenta el número de hogares y siguen la tendencia actual de consumo de GLP, mientras que en el escenario 2 el gasto va disminuyendo cada año por la penetración de estufas eléctricas que sustituyen el GLP para cocción de alimentos.

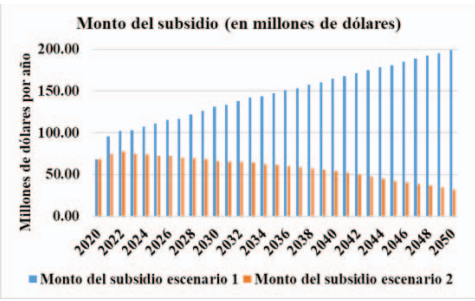


Figura 10. Proyección del desembolso para el subsidio de GLP

En términos monetarios se estimó que en el escenario 1 se gastan 4,500 millones de dólares en subsidio para los cilindros de 25 libras de gas licuado de petróleo; mientras que en el escenario 2 este monto baja a 1,740 millones de dólares, lo que representaría un ahorro de 2,716 millones de dólares, como se observa en la tabla 4.

TABLA 4. GASTO TOTAL EN SUBSIDIO 2021-2050

Análisis	Millones de B./ (2021 -2050)
Escenario 1 gris	4,459
Escenario 2 verde	1,743
Diferencia escenario 2- escenario 1	-2,716

- **Estimación de emisiones de gases de calentamiento global.**

En esta sección se realiza la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el escenario gris y el escenario verde dado el impacto que según investigaciones de la OMS se producen en la salud y el ambiente debido a la contaminación del aire por utilización de combustibles fósiles y sólidos para la cocción de alimentos [33] [6].

En la tabla 5 se muestran las toneladas de Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Óxido Nitroso (N_2O) que son producidas en el escenario gris debido a la quema de gas licuado para la cocción en el sector residencial. Al año 2050 se producen poco más de un millón de toneladas (1,000,000) de dióxido de carbono, 59 toneladas de metano y 21 toneladas de óxido nitroso.

TABLA 5. EMISIONES ESCENARIO GRIS.

Emisiones escenario gris	
Año	**2050**
Toneladas de CO_2	**1,010,290**
Toneladas de CH_4	**58.88**
Toneladas de N_2O	**20.65**

Por otro lado, en la tabla 6 se muestran las toneladas de Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Óxido Nitroso (N_2O) que son producidas en el escenario verde, hay menor cantidad de hogares que utilizan GLP y el uso de la leña es nulo, debido a los esfuerzos políticos y del mercado para reducir las emisiones y aumentar la eficiencia energética. Al año 2050 se producen cerca de cien mil toneladas (100,000) de dióxido de carbono, 4.6 toneladas de metano y 0.9 toneladas de óxido nitroso.

TABLA 6. EMISIONES ESCENARIO VERDE.

Emisiones escenario verde	
Año	**2050**
Toneladas de CO_2	**99,617**
Toneladas de CH_4	**4.63**
Toneladas de N_2O	**0.90**

Finalmente, en la tabla 7 se muestra el cálculo de las emisiones evitadas en el escenario verde, con respecto a las producidas en el escenario gris. El país puede dejar de emitir 910,674 Toneladas de CO_2, 54 Toneladas de metano CH_4 y 20 Toneladas de N_2O, lo cual es un aporte significativo a los NDC por sus siglas en inglés, compromisos que panamá adquirió ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

TABLA 7. EMISIONES EVITADAS.

Emisiones evitadas	
Año	**2050**
Toneladas de CO_2	**-910,674**
Toneladas de CH_4	**-54.25**
Toneladas de N_2O	**-19.75**

Al analizar estos resultados es claro que se debe acelerar el acceso a la energía debido a que beneficiará a las familias que no tienen acceso ni a electricidad ni a combustibles limpios para cocinar alimentos. Además, el aumento de la participación de la energía primaria renovable en el uso final, específicamente en el sector residencial, reducirá la emisión de contaminantes que provocan efectos nocivos sobre la salud de la población del país [18]. El aumento en el uso de tecnologías más eficientes reducirá el consumo de energía y las externalidades de los combustibles fósiles y sólidos, esto hará que las personas puedan disponer de recursos económicos y mejor salud para realizar otras actividades productivas [34].

En este análisis no se consideraron las emisiones provenientes del uso de electricidad para cocción, ya que estas dependen del tipo de generación despachada para suplir la demanda.

V. CONCLUSIONES

Los escenarios se definieron basados en la metodología top down y bottom up que resultaron en proponer el escenario gris y el escenario verde. El escenario gris determinó la línea base del estudio, para cuantificar el consumo tendencial del uso del GLP sin ningún tipo de cambios a nivel de política energética, es decir, BaU. En cuanto al escenario verde donde se da la sustitución de estufas de GLP por estufas eléctricas en el sector residencial, se obtiene el consumo energía eléctrica y de potencia, además se da una disminución del consumo de GLP del 83 % con respecto al escenario gris, donde se dejarían de utilizar 2,744,000 cilindros de GLP.

La proyección del monto del subsidio del GLP al año 2050 para ambos escenarios utilizando las proyecciones del precio dieron como resultado un total de 4,459 millones de balboas como monto acumulado del subsidio al GLP gastados en el escenario gris, mientras que para el escenario verde el gasto en subsidio fue de 1,743 millones de balboas. Por lo tanto, se observó un ahorro en subsidios con respecto al escenario gris de 2,716 millones de balboas cuando se implementa la sustitución de las estufas de GLP a eléctricas en el escenario verde.

Se calcularon las emisiones para el escenario gris y el escenario verde de los principales gases de calentamiento global: CO_2, CH_4 y N_2O; que producen al utilizar para cocción combustibles como el GLP. Se estimó que se pueden evitar 910,674 Toneladas de CO_2, 54 Toneladas de metano CH_4 y 20 Toneladas de N_2O.

Al finalizar esta investigación los trabajos a futuros que se pueden desarrollar están en la implementación de las políticas energéticas para la sustitución del GLP, donde se pueda probar lo establecido y realización de un estudio del impacto e incidencia que tendrían las estufas eléctricas y de inducción a gran escala en la red de distribución de energía eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Programa de investigación en "Microrredes, energías renovables y mercados eléctricos", gestionado en CEMCIT AIP. Igualmente, a la Secretaria Nacional de Energía por el apoyo dado a sus autores.

REFERENCIAS

[1] Secretaría Nacional de Energía, «Balances Energéticos-Panamá,» SNE, Panamá, 2016.

[2] Secretaría Nacional de Energía, «ACTUALIDAD ENERGÉTICA – PANAMÁ 2015-2017 - Un Sistema Energético en Transición,» Panamá, 2017.

[3] IRENA, «Evaluación del Estado de Preparación de las Energías Renovables Panamá,» Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dhabi, 2018.

[4] Smith, K., J. Rogers, and S. Cowlin, «Household fuels and ill-health in developing countries: what improvements can be brought by LP gas?,» World LP Gas Association, Paris, 2005.

[5] Banco Mundial, «Global Tracking Framework 2017: Progress Towards Sustainable Energy,» World Bank, Washington, D.C., 2017.

[6] WHO (World Health Organization), WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Household Fuel Combustion, Geneva: WHO, 2014.

[7] MECS , «Modern Energy Cooking Services - Publications,» 2021. [En línea]. Available: https://mecs.org.uk/publications/. [Último acceso: 2 Septiembre 2021].

[8] Andrew, P. G., Julian, D. M. and MilindKandlikar, D, «Health and Climate Benefits of Cookstovere Placement Options,» Energy Policy, p. 7530–7542, 2011.

[9] ESMAP, «Cooking with Electricity : A Cost Perspective - ESMAP,» 2020.

[10] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, New York: United Nations, 2018.

[11] Agencia Internacional de la Energía, "World Energy Outlook 2010." Panorama Mundial de la Energía., 2016.

[12] Agencia Internacional de la Energía, «World Energy Outlook 2011. Panorama Mundial de la Energía,» 2011.

[13] UN Women Watch, «Women, Gender Equality, and Climate Change.,» New York, 2009.

[14] Secretaría Nacional de Energía, Plan Energetico Nacional 2015-2050 Panamá el futuro que queremos, Panamá, 2016.

[15] S. Coate, «An Efficiency Approach to the Evaluation of Policy Changes,» National Bureau of Economic Research, Boston, 1999.

[16] Censo Nacional de Población y Vivienda, «Provincia-comarca indígena, algunas características de las viviendas,» INEC, Panamá, 2010.

[17] Grupo Banco Mundial, «World Bank,» 2014. [En línea]. Available: https://openknowledge.worldbank.org.. [Último acceso: Febrero 2019].

[18] Rosenthal, J., et al., Clean cooking and the SDGs: Integrated analytical approaches to guide energy interventions for health and environment goals, Energy for Sustainable Development, 2015.

[19] T. S. y. S. B. Wood, «Fuelwood and Charcoal Use in Developing Countries,» Annual Review of Energy, vol. 10, pp. 407-429, 1985.

[20] BID - Banco Interamericano de Desarrollo, «SE4ALL Evaluación Rápida y Análisis de Brechas,» BID, Panamá, 2014.

[21] International Energy Agency (IEA) and the World Bank, «Sustainable Energy for All 2017—toward Sustainable Energy,» World Bank, Washington, DC, 2017.

[22] CPUC (California Public Utilities Commission), «California Standard Practice Manual Economic Analysis of Demand-Side Programs and Projects,» 2001. [En línea]. Available: http://www.energy.ca.gov/greenbuilding/documents/background/07-J_CPUC_STANDARD_PRACTICE_MANUAL.PDF.

[23] The Energy to Cook: An Exploration of Modern Food Systems and Energy Consumption in Domestic Kitchens, «Energies,» 12 4 2021. [En línea]. Available: https:// doi.org/10.3390/en14134004.

[24] ESMAP, «State of the Global Clean and Improved Cooking Sector,» GACC, Washington, DC, USA,, 2015.

[25] California Energy Commission, «California's clean energy future, – an overview on meeting California's energy and environmental goals in the electric power sector in 2020 and beyond,» 2010.

[26] International Energy Agency, Key World Energy Statistics 2010, Paris: IEA, 2010.

[27] MIT, The Future of Natural Gas, Cambridge, MS: Massachusetts Institute of Technology, 2010.

[28] Coster, Edward J., Distribution Grid Operation Including Distributed Generation, NL: Technical University of Eindhoven, 2010.

[29] Contraloría General de la República, Panamá, «Resultados Finales Básicos,» Instituto de Estadística y Censo, 2010. [En línea]. Available: https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=362&ID_CATEGORIA=13&ID_SUBCATEGORIA=59. [Último acceso: Mayo 2020].

[30] Secretaría Nacional de Energía, «https://www.energia.gob.pa/,» Dirección de hidrocarburos, 2015. [En línea]. Available: https://www.energia.gob.pa/archivos/. [Último acceso: 1 Julio 2021].

[31] International Energy Agency, «Energy Access Outlook: from Poverty to Prosperity, World Energy Outlook-2017 Special Report,» IEA, Paris, 2017.

[32] Secretaría Nacional de Energía, «Estadisticas,» Octubre 2019. [En línea]. Available: https://www.energia.gob.pa/archivos/. [Último acceso: 02 07 2021].

[33] Environmental Protection Agency, «Capítulo 3 (Energy),» de Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2018, Washington, D.C., EPA, 2020, p. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories.

[34] Ministerio de la Presidencia, Secretaría de Energía, SDG7 Energy Compact of Panama, Action Agenda to advance SDG7 on sustainable energy for all.

Analyzing feasibility of the anaerobic codigestion of sewage sludge with organic fraction of municipal solid waste as an energy alternative in Panama

Análisis de factibilidad de la codigestión anaerobia de lodo de depuradora con fracción orgánica de residuos sólidos urbanos como alternativa energética en Panamá

Jessica Guevara-Cedeño
Facultad de Ing. Eléctrica,
Universidad Tecnológica
de Panamá,
Centro de Estudios
Multidisciplinarios en
Ciencias, Ingeniería y
Tecnología (CEMCIT
AIP), Panamá
Panamá, Panamá
jessica.guevara@utp.ac.pa
https://orcid.org/0000-
0002-7273-6848

Kevin Lee
Facultad de Ing. Eléctrica,
Universidad Tecnológica
de Panamá,
Panamá, Panamá
kevin.lee@utp.ac.pa

Aldo Batista
Facultad de Ing. Eléctrica,
Universidad Tecnológica
de Panamá,
Panamá, Panamá
aldo.batista1@utp.ac.pa

Euclides Deago
Centro de Investigaciones
Hidráulicas e
Hidrotécnicas (CIHH)
Universidad Tecnológica
de Panamá,
Centro de Estudios
Multidisciplinarios en
Ciencias, Ingeniería y
Tecnología (CEMCIT
AIP), Panamá
Panamá, Panamá
euclides.deago@utp.ac.pa
https://orcid.org/0000-
0002-6440-1204

***Abstract*— This research was focused on analyzing the technical and economic feasibility of the anaerobic codigestion of sewage sludge with organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) as an energy alternative in Panama. The accumulation of waste in communities has caused health problems and the energy matrix is highly dependent on petroleum derivates and water. For this reason, biomass was chosen as an alternative renewable source. Data from the Caimito wastewater treatment plant and the El Diamante landfill, both in Panama Oeste, were used. The research method was to characterize sewage sludge and municipal waste; calculate biogas. Among the most important results, it was possible to calculate a methane yield of 11 930.14 m^3/d. It was found that the anaerobic codigestion method is feasible due to the increased production of methane, which can be used for many energy purposes.**

Keywords*— *codigestion, biomass, biogas, sewage sludge, municipal waste

***Resumen* — Esta investigación se enfocó en analizar la viabilidad técnica y económica del método de codigestión anaerobia de lodo de depuradora con fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (foRSU) como alternativa energética en Panamá. La acumulación de basura en las comunidades ha causado problemas de salud y la matriz energética es muy dependiente de derivados de petróleo y agua. Por ese motivo, se eligió la biomasa como fuente renovable alternativa. Se utilizaron datos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Caimito y del relleno sanitario El Diamante, ambos en Panamá Oeste. El método de investigación fue caracterizar los lodos de depuradora y los residuos urbanos; calcular el biogás. Entre los resultados más importantes, fue posible calcular un flujo de metano de 11 930.14 m^3/d. Se pudo comprobar que el método de codigestión anaerobia es factible debido al aumento en la producción de metano, el cual se puede utilizar con muchos fines energéticos.**

Palabras claves* — *codigestión, biomasa, biogás, lodo de depuradora, residuos urbanos

I. Introduction

La biomasa es toda materia orgánica que se origina en un proceso biológico utilizable como fuente de energía. Una forma de obtener energía de la biomasa es utilizando la codigestión anaerobio, que es el tratamiento de dos o más residuos de distinta naturaleza para lograr efectos positivos tanto en el proceso como en la economía. Es una opción factible para superar los inconvenientes de utilizar mono-sustrato [1]. La primera vez que apareció un escrito científico sobre la codigestión fue en 1978 donde Miller et al. [2] lograron producir energía al utilizar precisamente el lodo de depuradora como sustrato principal y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (foRSU) como co-sustrato, permitiendo el tratamiento de una gama más amplia de desechos orgánicos. Entre los años 1987 y 2016, se publicaron 2363 artículos de codigestión anaerobia; de esa cifra, 177 artículos científicos fueron de codigestión entre lodo de depuradora y la foRSU [3]. Esto muestra que, con el paso del tiempo, aumenta el interés por parte de los investigadores hacia la codigestión.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00098

En Panamá el manejo de los residuos urbanos ha afectado a la población ya que hay situaciones donde están cerca de las comunidades y causan graves enfermedades respiratorias. Además, al no darle tratamiento a la basura, ésta ha causado graves problemas ambientales por su descomposición química. Un ejemplo es la liberación de lixiviados, que causan mucha contaminación en los ecosistemas. De acuerdo con la Secretaria Nacional de Energía (SNE), la composición porcentual del sistema de generación eléctrica en Panamá es de 60% de tecnologías renovables (hidroenergía, eólica, solar y biogás) y un 40% de tecnologías cuya fuente son combustibles fósiles derivados del petróleo (diésel, búnker y carbón) y gas natural [4]. Sin embargo, la matriz energética de Panamá es poco diversificada y fuertemente dependiente del consumo de derivados de petróleo, lo cual representa una desventaja para el país, pues la dependencia de este recurso afecta la sostenibilidad de la demanda energética en el sistema. Esta es una realidad que obliga a reducir el uso de estas tecnologías de generación y a adoptar otras fuentes renovables como la biomasa para diversificar la matriz de generación y mitigar las emisiones de gases [14].

El objetivo general de este trabajo es analizar la factibilidad técnica-económica de la utilización de lodo de depuradora y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos a través del método de codigestión anaerobia para la generación de energía eléctrica en Panamá. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: evaluar el potencial de biosólidos en Panamá para determinar la sostenibilidad de la materia prima.

II. Metodología

A. *Caracterización del lodo de depuradora*

La cantidad de lodos se pueden estimar con datos históricos, métodos empíricos y métodos basados en modelos matemáticos. Las estimaciones empíricas de producción de lodos se basan en cargas contaminantes actuales o proyectadas de la planta. Por lo tanto, se utilizó un modelo empírico para determinar la producción de lodos.

Los dos parámetros más fundamentales para la caracterización de aguas residuales son la demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y los sólidos suspendidos totales (SST). El valor DBO_5 indica la cantidad de oxígeno que las bacterias y otros microorganismos consumen durante 5 días a una temperatura de 20° C en una muestra de agua para la degradación aeróbica de las sustancias contenidas en el agua. Así que es una medida cuantitativa de la contaminación del agua por materia orgánica. En cambio, los SST son la cantidad de sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento. La Tabla 1 muestra la calidad del agua del influente de las PTAR de Caimito.

Tabla 1. Calidad del agua residual de la PTAR Caimito

Parámetro	Valor
$\mathbf{DBO_5}$	196.55 mg/L
$\mathbf{SST_{inf}}$	179.02 mg/L
Q	116 640 m^3/d

Ahora bien, además de saber los parámetros de calidad de agua residual para la PTAR, es necesario elegir parámetros de operación de la planta que son importantes para calcular la cantidad de lodo producido. Estos parámetros se muestran en la Tabla 2 y son valores teóricos aceptados en la literatura.

Tabla 2. Parámetros de operación para el cálculo de lodo de depuradora

Parámetro	Valor	Descripción
$\mathbf{R_1}$	60%	Remoción de SST en el sedimentador primario
$\mathbf{R_{DBO1}}$	30%	Remoción de materia orgánica en sedimentar primario
$\mathbf{R_2}$	90%	Remoción de sólidos en el sedimentador secundario
$\mathbf{R_{DBO2}}$	91%	Remoción de materia orgánica en sedimentador secundario
Fracc. SV en LP	65%	Fracción de sólidos volátiles contenidos en el lodo primario
Ratio lodo/ $\mathbf{DBO_{5\ elim.}}$	0.9	Ratio de lodo secundario producido a partir de DBO_5 eliminado

B. *Caracterización de residuos sólidos urbanos (RSU)*

El relleno sanitario El Diamante es el seleccionado para el caso de estudio correspondiente, dicho relleno sanitario está ubicado en el corregimiento de Playa Leona, distrito de La Chorrera, y el área aproximada es de 9.8 Ha.

Figura 1. Características físicas y geográficas del vertedero El diamante, Playa Leona [7].

Las características físicas y geográficas del relleno se pueden observar en la Figura 1, se encuentra aproximadamente a 250 m de una escuela, a 500 m de la comunidad más cercana y a más de 2 km del mar.

Para realizar los cálculos correspondientes a la generación de residuos sólidos se ha tomado como muestra la población de los distritos de La Chorrera y Arraiján y utilizar los datos de entrada correspondiente al emplazamiento de El Diamante ha permitido realizar un análisis de la generación de residuos producida por las habitantes de ambos distritos [8]. En la Tabla 3 se indican los datos correspondientes a la generación de residuos sólidos urbanos en el área de estudio, tales datos corresponden a los residuos domésticos y aquellos procedentes de la actividad económica.

TABLA 3. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LOS MUNICIPIOS EN ESTUDIO DEL RELLENO SANITARIO DE EL DIAMANTE [9].

Municipio	La Chorrera	Arraiján
Población estimada de 2016, según el INEC	190 093	276 999
Toneladas recolectadas en 2016	73 181	32 981
Toneladas/día	200.5	90.4
Volumen de residuos existentes en 2016	806 256	

La composición de los RSU generados se muestra en la Tabla 4 y suministra información esencial ya que permite definir el tratamiento más adecuado para cada tipo de residuo. Para este caso, el tipo de residuo indicado para la producción de biogás y metano son los residuos orgánicos producidos, pues poseen propiedades biológicas capaces de producir gases como el biogás, usado para generar energía eléctrica.

TABLA 4. COMPOSICIÓN DE RSU EN EL RELLENO SANITARIO DE EL DIAMANTE, PLAYA LEONA [ELABORACIÓN PROPIA, 8].

Material	Porcentaje (%)
Orgánico	33.2
Celulosas	9.9
Madera	2.0
Papel cartón	13.1
Envases complejos	1.5
Textiles	6.5
Cueros	0.1
Plásticos	15.4
Vidrio	3.0
Metales	4.4
Residuos peligrosos/ especiales	1.4
Inertes	4.3
Voluminosos	1.2
Miscelánea	1.4

Ahora bien, conforme al estudio previamente realizado por INECO [8], se han obtenido diversos rangos de composición de los residuos correspondientes a los residuos que son generados en los hogares (residuos domésticos) y los procedentes de actividades económicas (comercios, servicios e industrias). Los resultados de la caracterización de los residuos sólidos en el vertedero de La Chorrera arrojan que conforme a la generación de residuos sólidos en los municipios en estudio mostrado en la Tabla 4 el porcentaje correspondiente a residuos orgánicos es 33.2% de la generación per cápita total arrojando un resultado en masa orgánica pertinente a 96,578.80 kg; datos que son utilizados para calcular la generación de residuos orgánicos por cada habitante del área de estudio.

C. Cálculo de lodo primario

El lodo primario es el lodo producto de los procesos primarios de la planta: la remoción de SST en el sedimentador primario. El cálculo de lodo primario se realiza considerando los sólidos suspendidos totales (SST) del influente, la eficiencia de remoción de SST (R) y el caudal de operación de la planta de tratamiento (Q). La eficiencia se calcula con base a la remoción de SST en el decantador o sedimentador primario. Universalmente, esta eficiencia oscila entre 50% y 70%. Para mantener la homogeneidad en los cálculos, se utilizará el promedio de estos valores, es decir, se considera una remoción de 60% de SST para todos los casos. Con la eficiencia del decantador establecida, se calcula la masa de lodo primario a partir de la ecuación (1). La mayoría de las ecuaciones para el lodo de depuradora fueron obtenidas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [6]

$$\mathrm{M_{LP}} = \mathrm{SST_{inf}} * \mathrm{R} * \mathrm{Q} \quad (1)$$

Una vez establecida la masa de lodo primario, se calcula la cantidad de masa orgánica que contiene el lodo primario a partir de su cantidad de sólidos volátiles (SV). Si no se conocen los SV en el influente se pueden utilizar datos de la literatura; por ejemplo, Metcalf y Eddy [10] indican que, para lodos primarios no tratados, los SV en el lodo primario están dentro de un rango de 60-80% de los ST y con un valor típico de SV=0.65 con respecto a los ST. La masa orgánica de lodo primario se calcula con la ecuación (2).

$$\mathrm{M_{OLP}} = \mathrm{Fracc.\ SV\ en\ LP} * \mathrm{M_{LP}} \quad (2)$$

Esta masa orgánica de lodo primario es la que se enviará al digestor anaerobio y se combinará con la masa orgánica de lodo secundario.

D. Cálculo de lodo secundario

El lodo secundario es el lodo proveniente del tratamiento secundario donde se remueve el DBO_5 presente en el líquido y es rico en lodo activo. El cálculo de lodo secundario es un poco más complejo que el del lodo primario porque depende de las variables que afectan al crecimiento de las bacterias. En este proceso, la DBO_5 es convertida en sólidos suspendidos volátiles (SSV). La masa de lodo secundario se calcula mediante el procedimiento descrito a continuación.
Primero, el rendimiento de remoción de DBO_5 en el sedimentador primario (R_{DBO1}) es 30%, por lo que en el sedimentador secundario entra el 70% de DBO_5 y se calcula mediante la ecuación (3).

$$\mathrm{DBO_{5(1)}\ entra\ al\ sedimentador\ secundario} = \mathrm{Q} * \mathrm{DBO_5} * (1 - \mathrm{R_{DBO1}}) \quad (3)$$

Luego, el rendimiento de eliminación de DBO_5 en el sedimentador secundario (R_{DBO2}) oscila entre el 90% y 92%. Se elige 91%, que es el promedio de los dos valores, así que el DBO_5 eliminado se calcula con la ecuación (4).

$$\mathrm{DBO_{5(2)}\ eliminado} = \mathrm{DBO_{5(1)}} * \mathrm{R_{DBO2}} \quad (4)$$

Luego de determinar los kilogramos de DBO_5 eliminados en el sedimentador secundario, se calcula la masa orgánica de lodo secundario (refiérase a la ecuación 5) a partir del ratio $\frac{kg\ lodo}{kg\ DBO_5\ eliminado}$. Esta ratio para proceso de lodos activos convencionales está entre 0.7 y 1.1. La elección fue de 0.9.

$$\mathrm{M_{OLS}} = \mathrm{DBO_{5(2)}} * \mathrm{ratio}\ \frac{\mathrm{kg\ lodo}}{\mathrm{kg\ DBO_5\ eliminado}} \quad (5)$$

Una vez determinados la masa orgánica de lodo primario y secundario, se calcula la masa orgánica de lodo crudo, que es la suma de los dos y el que entra al digestor para iniciar la digestión anaerobia tal como se refleja en la ecuación (6).

$$M_{OLC} = M_{OLP} + M_{OLS} \quad (6)$$

E. Potencia y energía disponibles

Para el cálculo de la potencia y generación de energía, se utiliza motores de combustión interna acoplados a un generador sincrónico. La elección se debe a que estos motores presentan alto rendimiento térmico de generación eléctrica. Esta eficiencia varía entre 25 y 35%, y la energía térmica se puede utilizar en aplicaciones de cogeneración. Además de que es posible añadir o remover motores según la tendencia de generación de biogás. La potencia es el incremento de trabajo por unidad de tiempo, y generalmente se mide en joules por segundo (watts). En el caso de los motores de combustión interna, la potencia disponible depende del caudal del biogás según la ecuación (7).

$$\text{Potencia disponible [kW]} = \eta_t \times PCI_{biogás} \times Q_{biogás} \quad (7)$$

Donde:
η_t: Rendimiento térmico de generación eléctrica. Asume valores entre 25% y 35%.
$PCI_{biogás}$: Poder calorífico inferior del biogás: se asume $5\,\frac{kWh}{m^3}$.
$Q_{biogás}$: Caudal del biogás capturado ($m^3\,\frac{CH_4}{hora}$)

La energía es la capacidad que tiene un cuerpo de realizar trabajo, y si el área de estudio es la electricidad, se mide en kWh. La energía eléctrica que la planta genera por día se estima en función de la potencia disponible y un factor de disponibilidad de 85% por mantenimiento según la ecuación (8).

$$\text{Energía}\left[\frac{\text{kWh}}{\text{d}}\right] = (\text{Potencia disponible}) * 24 * 0.85 \quad (8)$$

III. Resultados y discusión

A. Producción de lodo de depuradora

Los 5 ríos que alimentan la PAR Caimito son: Perequete, Perequetecito, Rodeo, Martín Sánchez, Caimito, Bernardino y Aguacate. Los componentes de las aguas de estos ríos dependen de la cantidad de comunidades e industrias se encuentren cerca de los ríos. En la Tabla 5 se observa las características fisicoquímicas del agua residual de Arraiján y La Chorrera y sirvió para su caracterización.

De los datos observados, lo que es de interés es el nivel de contaminación del agua que viene determinado por la cantidad de DBO_5 (196.55 mg/L) y SST (179.02 mg/L) porque fueron los datos principales para el cálculo de lodo de depuradora. Se considera que es un nivel bastante alto debido a que estos ríos se encuentran en zonas urbanas donde la mayor parte de los residuos domésticos y algunos industriales se vierten en los ríos. La contaminación de los ríos es mayor en estación seca que lluviosa debido a que el flujo de agua en estación seca es menor y los desechos permanecen durante más tiempo en los ríos. A continuación, en la Tabla 6 se muestra el cálculo del lodo primario y secundario en sus diferentes procesos desde que entran al sedimentador primario y secundario hasta llegar al digestor anaerobio.

TABLA 5. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL DE ARRAIJÁN Y LA CHORRERA [5].

Parámetro	**Promedio Ponderado**	
	Temporada Lluviosa	**Temporada Seca**
Temperatura (°C)	31.885	30.85
pH	7.72	7.48
Oxígeno Disuelto (mg/L)	3.32	2.54
Conductividad (**µS/cm**)	313.98	---
DBO_5 total (mg/L)	161.79	196.55
DBO_5 soluble (mg/L)	87.58	88.54
DQO/ **DBO_5** (mg/L)	1.70	2.08
Aceites y Grasas (mg/L)	43.79	44.60
Fósforo (mg/L)	5.10	4.76
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	21.60	21.06
Nitrógeno Orgánico (mg/L)	8.85	12.22
Sólidos Suspendidos (mg/L)	90.82	179.02
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	1.50E+06	2.33E+06
Parámetro	Promedio Ponderado	
	Temporada Lluviosa	**Temporada Seca**
Temperatura (°C)	31.885	30.85
pH	7.72	7.48
Oxígeno Disuelto (mg/L)	3.32	2.54
Conductividad (**µS/cm**)	313.98	---
DBO_5 total (mg/L)	161.79	196.55
DBO_5 soluble (mg/L)	87.58	88.54

Los parámetros de operación para el cálculo de lodo de depuradora se explicaron en el capítulo de la metodología. Como se observa, la masa orgánica de lodo crudo es de 21.29 t/d. Esta cifra equivale a la suma de las masas orgánicas de lodo primario y secundario, y es la que entra al digestor anaerobio.

TABLA 6. CÁLCULO DE LODO EN PTAR CAIMITO [ELABORACIÓN PROPIA].

Descripción	**Fórmula y sustitución de valores.**	**Resultado**
Masa de lodo primario	$M_{LP} = SST_{inf} * R * Q$	$12.53\,\frac{t}{d}$
	$M_{LP} = \frac{179.02\,\frac{mg}{L} * 0.6 * 116\,640\,\frac{m^3}{d}}{1\,000\,000}$	
Masa orgánica de lodo primario	$M_{OLP} = \text{Fracc. SV en LP} * M_{LP}$	$\mathbf{8.14\,\frac{t}{d}}$
	$M_{OLP} = 0.65 * 12.53\,\frac{t}{d}$	
DBO_5 que entra al sedimentador secundario	$DBO_{5(1)} = Q * DBO_5 * [\![(1 - R)]\!]_{DBO1}$	$16.05\,\frac{t}{d}$
	$DBO_{5(1)} = \frac{\left[116\,640\,\frac{m^3}{d} * 196.55\,\frac{mg}{L} * (1 - 0.3)\right]}{1}$ 00(	
	$DBO_{5(2)} = DBO_{5(1)} * R_{DBO2}$	

DBO_5 eliminado en el sedimentador secundario	$DBO_{5(2)} = 16.05\ \frac{t}{d} * 0.91$	$14.6\ \frac{t}{d}$
Masa orgánica de lodo secundario	$M_{OLS} = DBO_{5(2)} * ratio\ \frac{kg\ lodo}{kg\ DBO_5\ eliminado}$ $M_{OLS} = \mathbf{14.6}\ \frac{t}{d} * 0.91$	$\mathbf{13.14}\ \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{d}}$
Masa orgánica de lodo crudo	$M_{OLC} = M_{OLP} * M_{OLS}$ $M_{OLC} = 8.14\ \frac{t}{d} + 13.14\ \frac{t}{d}$	$\mathbf{21.29}\ \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{d}}$

B. Producción de foRSU

Si el ratio de mezcla para la codigestión anaerobia es de 80% lodo y 20% foRSU, entonces para 21.29 toneladas de lodo, deben haber 5.32 toneladas de foRSU. Al tener ese valor fijo, y tomando en cuenta que la cantidad de materia orgánica en la basura es de 33.2%, la cantidad de residuos sólidos que se necesitan del vertedero se calcula con la siguiente fórmula:

$$RSU = \frac{5.32\ \frac{t}{d}}{0.332} = \mathbf{16.02}\ \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{d}}$$

C. Generación de biogás y metano

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al biogás y metano generado por la digestión de los 3 sustratos de tal manera que se puedan comparar. En la Tabla 7 muestra la generación a partir de lodo; la Tabla 8, a partir de foRSU; y la Tabla 9, a partir de codigestión.

TABLA 7. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS Y METANO A PARTIR DE LODO EN PTAR CAIMITO [ELABORACIÓN PROPIA].

Descripción	Fórmula y sustitución de valores.	Resultado
Porcentaje de destrucción de STV en digestor de mezcla completa	$V_d = 13.7 \ln(TRS) + 18.9$ $V_d = 13.7 \ln(40) + 18.9$	70.44 %
Masa orgánica de STV	$M_{OD} = V_d * M_{OLC}$ $M_{OD} = 0.7044 * 21.29 \frac{t}{d}$	$15\ \frac{t}{d}$
Flujo de biogás generado	$Q_{biogás} = ratio \frac{m^3\ biogás}{kg\ STV_{elim.}} * M_{OD}$ $Q_{biogás} = 0.714 \frac{m^3\ biogás}{kg\ STV_{elim.}} * 15\ \frac{t}{d} * 1000$	$\mathbf{10\ 710}\ \frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{d}}$
Flujo de metano generado	$Q_{CH4} = \%_{metano} * Q_{biogás}$ $Q_{CH4} = 0.6547 * 10\ 710\ \frac{m^3}{d}$	$\mathbf{7011.84}\ \frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{d}}$

De las tablas se puede observar que los 3 sustratos presentan el mismo porcentaje de destrucción de STV (70.44%) ya que depende de la cantidad de días que la biomasa permanece en el digestor y los 3 sustratos permanecieron la misma cantidad de días. Con el fin de realizar una comparación, la Figura 3 muestra el flujo de biogás y metano de los sustratos.

TABLA 8. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS Y METANO A PARTIR DE FORSU [ELABORACIÓN PROPIA].

Descripción	Fórmula y sustitución de valores.	Resultado
Porcentaje de destrucción de STV en digestor de mezcla completa	$V_d = 13.7 \ln(TRS) + 18.9$ $V_d = 13.7 \ln(40) + 18.9$	70.44 %
Masa orgánica de STV	$M_{OD} = V_d * M_{OLC}$ $M_{OD} = 0.7044 * 5.32 \frac{t}{d}$	$3.75\ \frac{t}{d}$
Flujo de biogás generado	$Q_{biogás} = ratio \frac{m^3\ biogás}{kg\ STV_{elim.}} * M_{OD}$ $Q_{biogás} = 1.29 \frac{m^3\ biogás}{kg\ STV_{elim.}} * 3.75\ \frac{t}{d} * 1000$	$\mathbf{4\ 837.50}\ \frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{d}}$
Flujo de metano generado	$Q_{CH4} = \%_{metano} * Q_{biogás}$ $Q_{CH4} = 0.6283 * 4\ 837.50\ \frac{m^3}{d}$	$\mathbf{3\ 039.40}\ \frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{d}}$

TABLA 9. ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS Y METANO A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN [ELABORACIÓN PROPIA].

Descripción	Fórmula y sustitución de valores.	Resultado
Porcentaje de destrucción de STV en digestor de mezcla completa	$V_d = 13.7 \ln(TRS) + 18.9$ $V_d = 13.7 \ln(40) + 18.9$	70.44 %
Masa orgánica de STV	$M_{OD} = V_d * M_{OLC}$ $M_{OD} = 0.7044 * (5.32 + 21.29) \frac{t}{d}$	$18.74\ \frac{t}{d}$
Flujo de biogás generado	$Q_{biogás} = ratio \frac{m^3\ biogás}{kg\ STV_{elim.}} * M_{OD}$ $Q_{biogás} = 0.871 \frac{m^3\ biogás}{kg\ STV_{elim.}} * 18.74\ \frac{t}{d} * 1000$	$\mathbf{16\ 322.54}\ \frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{d}}$
Flujo de metano generado	$Q_{CH4} = \%_{metano} * Q_{biogás}$ $Q_{CH4} = 0.7309 * 16\ 322.54\ \frac{m^3}{d}$	$\mathbf{11\ 930.14}\ \frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{d}}$

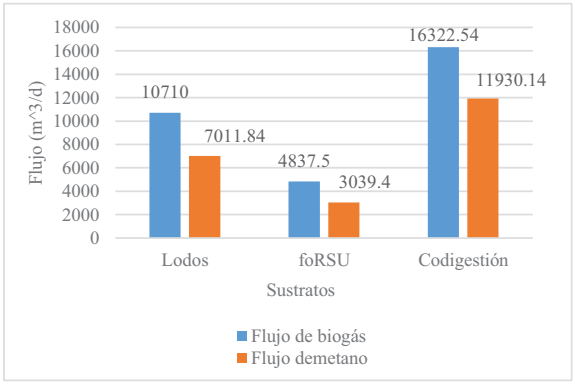


Figura 3. Flujo de biogás y metano de los sustratos.

La suma del flujo de biogás producido por la digestión separada de lodo y foRSU fue de 15 547.5 m^3/d; en cambio, el biogás generado por la codigestión fue de 16 322.54 m^3/d. Esto demuestra la afirmación de que el biogás producido por

la digestión conjunta de dos residuos cuyas propiedades se complementan es mayor que el biogás producido por la digestión de cada sustrato de forma separada. Además, ese biogás se almacena en un tanque de almacenamiento de biogás, y tener un solo tanque grande es económicamente más factible y ocupa menos espacio que tener dos tanques pequeños separados.

Además, la verdadera ventaja de la codigestión se presenta en el flujo de metano generado. El análisis es similar al realizado con el biogás. El porcentaje de metano en el biogás es de 65.47% para los lodos, 62.83% para la foRSU y 73.09% para la codigestión. La suma del flujo de metano producido por la digestión de separada de lodo y foRSU fue de 10 051.24 m^3/d; en cambio, el metano producido por la codigestión fue de 11 930.14 m^3/d. Esto demuestra la factibilidad técnica debido a que el porcentaje de metano en el biogás es mayor en la codigestión y se aprovecha al máximo las propiedades energéticas del biogás.

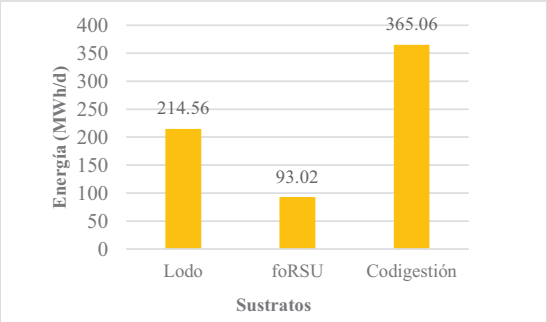


Figura 4. Energía generada a partir de los sustratos.

De la Figura 4 se puede observar que la suma de la energía generada por la digestión separa de lodo y foRSU fue de 307.58 MWh/d; en cambio, la energía generada por la codigestión fue de 365.06 MWh/d. Esta energía puede ser utilizada para suplir con las necesidades energéticas de la planta y el excedente puede ser inyectado a la red eléctrica.

IV. Conclusiones

Después de realizar la caracterización de los biosólidos, se lograron resultados optimistas en cuanto a la generación de biogás y metano, componentes útiles para la producción de energía. Al aplicar la codigestión anaerobia, la cantidad de metano y energía eléctrica producida fue mayor que la digestión de mono-sustrato. Esto indica que el método de codigestión es eficaz en términos de obtención de metano a partir de la mezcla de dos sustratos. Esta técnica puede ser aplicada en las PTAR's tanto a nivel municipal como en comunidades rurales pequeñas.

Agradecimiento

Agradecemos a. SENACYT por hacer posible el desarrollo de este trabajo, a través del proyecto IDDS19-008. Codigestión anaeróbica de biosólidos de aguas residuales y desechos orgánicos municipales como alternativa energética sostenible. Igualmente, al Programa de investigación en "Microrredes, energías renovables y mercados eléctricos"

References

[1] J. Mata-Alvarez, J. Dosta, S. Macé y S. Astals, "Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling", Critical Reviews in Biotechnology, vol. 31, n.º 2, pp. 99–111, febrero de 2011. Disponible: https://doi.org/10.3109/07388551.2010.525496

[2] J. Miller, J. Swartzbaugh and C. Wiles, "Fuel production from organic residue: sludge mixtures", AIChE Symposium Series, vol. 74, pp. 117-122, 1978.

[3] V. K. Tyagi, L. A. Fdez-Güelfo, Y. Zhou, C. J. Álvarez-Gallego, L. I. R. Garcia y W. J. Ng, "Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 93, pp. 380–399, octubre de 2018.Disponible: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.051

[4] SNE. Secretaria Nacional de Energía: "lineamientos estratégicos agenda de transición energética 2020-2030". Panamá, 2020.

[5] Ministerio de Salud, Estudios Técnicos de Factibilidad y Diseño Básico para el Saneamiento de los Distritos de Arraiján y La Chorrera, Panamá, 2015.

[6] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales, Ciudad de México, 2017.

[7] AAUD. Autoridad de Aseo Urbano y domiciliario: Diagnóstico de los Vertederos a Nivel Nacional. Panama, 2019. [En línea]. Disponible en: http://www.aaud.gob.pa/index.asp?id=Plan_Estrategico

[8] INECO. "Plan Nacional de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (2017-2027)". Análisis y diagnóstico de la situación actual. Tomo 1. Panamá, julio 31, 2017.

[9] Etesa, Plan de expansión del sistema interconectado nacional 2015-2050, Panamá, 2016.

[10] E. Metcalf, Wastewater Engineering Treatment & Reuse. McGraw-Hill Education, 4a ed. 2013.

[11] F. Heisig, A. Mohr, "Costo de abatimiento de nueva energía (LACE) y costo de desarrollo de la energía (LCOE): La nueva forma de determinar la entrada de nuevas tecnologías al sistema", 2016.

[12] ETESA. "Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional 2018 – 2032". Capítulo 5. Pag (112-117). [En línea]. Disponible en: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/electricidad/consultas_publicas/2017_18/cp_013-2018/anexo_b/tomoII-plan_indicativo_generacion2018-2032/tomoII-plan_indicativo_generacion2018-2032.pdf [accedido: 5-mar-2021].

[13] Jenbacher J620, "especificaciones técnicas", KTS Engineering, 2021. [En línea]. Disponible en: https://kts-eng.com/en/equipment/gas-engines/type-6/jenbacher-j-620-gs/ [accedido: 7-abri-2021].

[14] SNE. Secretaria Nacional de Energía: "lineamientos estratégicos agenda de transición energética 2020-2030". Panamá, 2020.

A Comparative Study of Denoising Techniques for UHF Signals from Partial Discharge

Carlos Boya-Lara
Research Directorate
Universidad Interamericana de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
carlos.boya@uip.pa

Omar Rivera-Caballero
High Voltage Electrical Testing Laboratory (LEEAT)
Universidad Interamericana de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
omar.rivera@ieee.org

Jorge Alfredo Ardila-Rey
Department of Electrical Engineering
Universidad Técnica Federico Santa Maria
Santiago de Chile, Chile
jorge.ardila@usm.cl

***Abstract*— In this work, a comparative study of three typical denoising techniques for UHF signals from Partial Discharge (PD) sources is carried out: Wavelet Transform (WT), Variational Mode Decomposition (VMD), and Multiscale PCA (MSPCA). First, the techniques are applied to synthetic signals created from mathematical models to establish the best operating parameters. Subsequently, an experimental set-up is carried out to generate PDs and thus UHF signals, ensuring an environment with white noise and periodic type interference signals. The results, for both synthetic and real UHF signals, indicate that MSPCA is superior to WT and VMD. However, in the case of real UHF signals, MSPCA is observed to distort the waveform to such an extent that the wavefront is attenuated. The VMD technique also has a distortion effect on the signal, although not as pronounced. On the other hand, WT exhibits less noise mitigation, but less signal distortion than VMD and MSPCA. From this study, we conclude that before applying a denoising technique, it is important to analyze its effect on the waveform and not only take performance criteria into account. If this is not considered, downstream tasks such as classification, identification, and localization that extract features from waveforms may be affected.**

Keywords—Partial Discharges, UHF, denoising, VMD, Wavelet Transform, Multiscale PCA,

I. Introduction

Equipment that constitutes power systems in distribution networks, such as generators, motors, transformers, or power conductors, are vital to maintaining a quality of life in today's society. Thanks to its optimal state, a continuous supply of electricity to homes, businesses, industries, and government is achieved. A fundamental element of these electrical machines is their insulation system, which fulfills the function of supporting, separating, and isolating their energized parts, so the reliability of the machine depends on the insulation [1]. The electrical insulator is made up of dielectric materials, which can withstand an intense electric field before reaching a rupture condition, known as "breakdown" [2]. The maximum field value at which the insulator loses its properties is known as dielectric strength and this capacity can be reduced due to defects developed during manufacturing or equipment operation [3].

When these defects are in a part of the total confining insulation between two electrodes, they can generate local breakdowns, which are known as partial discharges (PD) [2], [4]. These PDs are very low energy and short in duration (<1μs), however, once present, even if intermittent, their damage always increases over time [5]. This deterioration process can spread and develop in a wide area of the insulation, affecting its dielectric properties and generating a total failure or flashover. The PD measurement is an important tool to monitor the condition of the electrical insulation with the aim of evaluating its deterioration and aging [6]. The measurement is based on the energy exchange that takes place during the discharge and that manifests itself as current pulses, dielectric losses, sound, increased gas pressure, chemical reactions [7].

Due to the impulsive nature of PDs, electromagnetic radiation is emitted over a wide spectrum, including the UHF range (300MHz-3000MHz) [8], [9]. In this way, a UHF technique has been developed to detect PD, which has advantages such as over the conventional electrical detection method, based on galvanic coupling parallel to the test object to measure the current pulses induced by the charge displacement that produces the PD [4]. Among the most outstanding advantages is its easy installation, in addition to being placed at safe distances from electrical risk, and the possibility the PD source localization [8].

A UHF PD detection system usually consists of a measurement module and data analysis module. The first is formed by a UHF sensor (antennas) and signal conditioning circuits (filters and amplifiers). While a data analysis module is a series of algorithm programs running on the computer with the aim of denoising, identifying, and classifying the PDs [10]. This technique has been widely used and many types of sensor and processing techniques have been proposed to support decisions about the state of the insulation [11]–[14]. However, there is still a gap between what is developed experimentally and when it is implemented in the field, often leading to false alarms and incorrect diagnoses [10]. One reason for this challenge is the presence of different types of noise that are coupled to the UHF measurement and that are complex to remove: white noise, narrow-band noise, and impulsive noise [15]. White noise is made up of shot, flicker, burst, thermal and random noise [16]. While the narrow-band noise is due to frequency modulated radio, television broadcasting, mobile telephones, and Wi-Fi [8]. Impulsive noise is divided into periodic impulsive noise (generated by power electronic equipment) and random

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00099

impulsive noise (corona discharges) according to whether its waveform shows repeatability [10].

Multiple solutions have been proposed to treat one or more types of noise. We can highlight the works presented in [17]–[20], where the Wavelet Transform (WT) is applied to decompose the UHF signals into signals composed of coefficients that represent the energy variations at various scales or frequencies. Subsequently, a rule is applied to establish a threshold and discard coefficients that are related to noise at each decomposition level. Once this process is done, the signal is composed again but with less noise effect. In [14], a multivariate denoising tool known as Multiscale Principal component analysis (MSPCA) is used. The UHF signal is decomposed by WT and then Principal Component Analysis (PCA) is applied and based on a threshold, discard the components that are noise. A combination of Variational Mode Decomposition (VMD) and Singular Spectrum analysis (SSA) for UHF signal denoising is proposed in [21]. The UHF signal is decomposed into a series of band-limited intrinsic mode functions (BLIMFs). Next, an SSA-based thresholding technique is presented to suppress the residual white noise in each BLIMF, and the final denoised signal is synthesized by these denoised BLIMFs. In general, WT denoising is the most popular technique for UHF signals as has been noted in one of the most recent reviews focused on the UHF technique for PDs [10]. However, VMD is growing in popularity.

In this work, we present a comparative analysis between these three denoising techniques applied to real UHF signals from PDs: WT, VMD, and MSPCA. The techniques are first tested with synthetic UHF signals with the aim to evaluate the algorithms in a controlled environment and establish the best parameters. Then, they are used for real UHF signal denoising generated in an experimental set-up to evaluate the techniques in a real environment and establish their operational advantages and disadvantages.

II. Denoising Techniques

This section describes the techniques used for this study.

A. WT Denoising

The WT decomposes a signal x_j into components that appear at different scales or frequencies. It can be used to analyze signals with non-stationary power at many different frequencies [22]. With WT, the signal is decomposed into its low- (i.e., approximation) and high-frequency (i.e., detail) components. Two parameters are fundamental in the application of the WT: Mother Wavelet (MW) and the decomposition level L. MW is a function with zero mean and localized in both time and frequency space. For a better representation of the signal at different scales, MW must be very similar to the signal to be decomposed. On the other hand, the decomposition level must be able to detect all the relevant changes in the signal and provide as much information as possible. In general, the choice of MW and L is based on experience and the characteristics of the signal of interest.

To perform WT denoising, x_j is decomposed to a level L with the chosen MW. The result is a number N_i of coefficients per level i, which corresponds to the correlation between the MW and the signal. Then it proceeds to discard the coefficients of each level that are related to noise by means of a threshold rule. After discarding, the signal is rebuilt [23]. Among the most used discard rules are the Universal thresholding rule developed by Dohono and Johnston [24]:

$$\lambda = \sigma\sqrt{2\log(N)} \tag{1}$$

where σ is the noise standard deviation, N is the signal length and λ is the threshold. This threshold λ is used to discard coefficients at all levels. Also, it is used a rule which is level-dependent [25]:

$$\lambda_i = \frac{m_i\sqrt{2\log(N_i)}}{0.6745} \tag{2}$$

where m_i is the median of i level, N_i is the number of coefficients in the i level and λ_i for each i level. The 0.6745 rescaling factor makes equation (2) well suited for a zero mean Gaussian white noise model.

The threshold can be used in two ways: hard or soft thresholding. Hard thresholding processes data in such a way that those wavelet coefficients whose absolute values are greater than the threshold are kept and those less than the threshold are set to zero. And soft thresholding sets the wavelet coefficients below the threshold to zero. The coefficients greater than the threshold are kept and then shrunk toward zero [23].

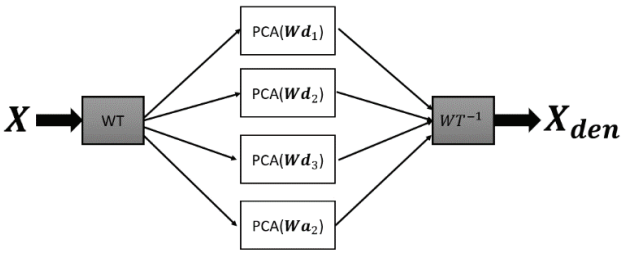


Fig. 1. MSPCA process, where $\boldsymbol{X}$ is input signal matrix and $\boldsymbol{X_{den}}$ is ouput signal matrix after the denoising.

B. MultiScale PCA

MSPCA combines WT and PCA to remove noisy components from a signal. PCA seeks the most optimal linear combination of decorrelated variables, called Principal Components (PC), from original signals with zero mean while retaining as much information as possible from these latter signals. Fig. 1 shows the MSPCA process, where $\boldsymbol{X}$ is a matrix of size MxN where M is the number of UHF signals x_j. The WT is applied to each x_j to form L detail coefficient matrices $\boldsymbol{Wd}_i$ (MxN_i) per level i. Also, an approximation matrix $\boldsymbol{Wa}$ (MxN_L) is generated where N_L is the length of wavelet coefficients in the last level. Then the PCA is applied to each $\boldsymbol{Wd}_i$ and $\boldsymbol{Wa}$ and a suitable number of significant PCs are chosen. Then inverse

WT is applied to reconstruct the denoising signal. The selection of PCs is made using a threshold based on the percentage of energy that each PC contributes. The PCs are ordered according to this contribution and a threshold is established where the number of components that contribute up to a percentage of energy is retained. More details about this method can be reviewed in [26], [27].

C. Variational Mode Decomposition (VMD)

The goal of VMD is to decompose the signal into a discrete number of sub-signals (modes), u_k , that have specific sparsity properties while reproducing the input. They are called band-limited intrinsic mode functions (BLIMFs). Here, the sparsity prior to each mode is chosen to be its bandwidth in the spectral domain. In other words, it is assuming each mode k is mostly compact around a center pulsation ω_k which is to be determined along with the decomposition [28]. Conceptually, this decomposition scheme is like the WT process; however, each mode k is iteratively updated corresponding to the current estimate of the mode's center-frequency ω_k so that it is the center-gravity of the mode's power spectrum [21]. Once the decomposition with VMD has been carried out, it is necessary to use a criterion to discard the modes related to noise. In the work proposes by Zhang et al. in [21] for denoising UHF signals with VMD, kurtosis is used to discard the modes as follows:

$$BLIMF = u_k \; s.t. \; kurtosis \; \varepsilon \; and \; f_0(u_k) > 0.3GHz \qquad (3)$$

where $\varepsilon = 10$ is a threshold and f_0 is the central frequency operator which is the maximum spectral peak of BLIMF.

VMD performance is affected by three parameters: the number of modes k, a quadratic penalty term a, and the time-step of the dual ascent ϱ. For the case of denoising, the value ϱ is suggested to be zero, being a and k the parameters to select empirically. In this work, we will establish $a = 2000$ following the suggestion of the work published in [21] and we will vary k until we get the best performance.

III. Experimental Results

The comparative study is carried out, first, by applying the three techniques to UHF synthetic signals generated by a mathematical model to evaluate the best operating parameters. Subsequently, they are applied to real UHF signals generated by an experimental setup.

A. Denoising of synthetic UHF signals

To generate the noise signals x_j, the following mathematical model is used:

$$x_j(t) = s_j(t) + g_j(t) + \nu_j(t) \qquad (4)$$

where s_j are original signal without noise, g_j is a narrowband periodic interference signal, ν_j is a white noise interference signal, $j = 1,2,\dots,M$ signals and t is sample index. The model mathematical of s_j [21]:

$$s_j = A\left(e^{-\frac{1.3t}{\tau}} - e^{-\frac{2.2t}{\tau}}\right)\sin(2\pi f t) \qquad (5)$$

where A is the amplitude, τ is the attenuation coefficient, f is the oscillation frequency and $j = 1,2,\dots,M$ signals. The narrowband periodic g_j as follows:

$$g_j = B\sin(2\pi f_p t) \qquad (6)$$

where B is the amplitude and, f_p is the periodic frequency. The ν_j is generated in such a way that the signal-to-noise (SNR) varies from 0dB, -5dB and -10dB.

With these models, 25 signals were generated with $N = 3000$ samples: one set for each SNR. The τ, A and B parameters were randomly varied to have a variety of signals. Periodic signals g_j with frequencies of 100MHz, 300MHz, 800MHz, 900MHz and 1500MHz were added to each signal to simulate telecommunication signals. Fig. 2 shows an example of a signal generated by the mathematical model with SNR= -10dB.

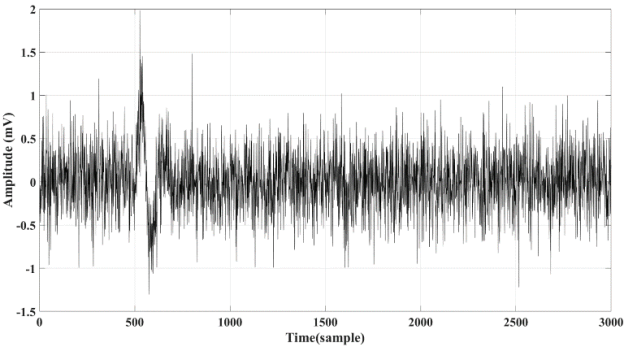


Fig. 2. An example of a signal generated by the mathematical model with SNR= -10dB.

To evaluate the performance of each technique, the change in the SNR was used, that is, how much the technique increases the SNR [15]:

$$SNRperf = 10log\frac{\sum_1^N s_j(n)^2}{\sum_1^N [s_j(n) - \hat{x}_j(n)]^2} \qquad (7)$$

where $\hat{x}_j$ is the denoising signal. The other performance index is the waveform correlation coefficient (NCC) that indicates if the signal is distorted by the technique [15].

$$NCC = \frac{\sum_1^N s_j^*(n)\hat{x}_j(n)}{\sqrt{\sum_1^N s_j(n)^2 \sum_1^N \hat{x}_j(n)^2}} \quad (8)$$

TABLE 1 shows the parameters for the best performance of each technique. TABLE 2 shows the results for the three techniques for the three noise levels. The average and standard deviation for the 25 signals is shown. The best results are highlighted in red. As noise intensity increases, the SNR achieved by the techniques decreases. From these results MSPCA outperforms WT and VMD.

TABLE 1. LIST OF OPERATING PARAMETERS FOR EACH OF THE DENOISING TECHNIQUES.

Technique	Parameters
WT	MW: symlet 8, L=10, Threshold Rule= Level Independent and soft
VMD	k=10, $\varrho = 0$, $a = 2000$
MSPCA	Number of selected PCs=3, MW: Daubechies 15.

TABLE 2. RESULTS FOR EACH OF THE DENOISING TECHNIQUES. THE BEST RESULT IS HIGHLIGHTED IN RED.

Performance indexes	Noise (dB)					
	SNR 0		SNR -5		SNR -10	
	Mean	*Std*	*Mean*	*Std*	*Mean*	*Std*
			WT			
SNRperf	13.88	0.95	9.09	1.10	4.94	1.26
NCC	0.98	0.00	0.95	0.02	0.86	0.03
			VMD			
SNRperf	11.27	0.96	6.77	0.89	1.26	0.76
NCC	0.97	0.01	0.93	0.02	0.83	0.05
			MSPCA			
SNRperf	**15.45**	0.89	**12.10**	1.34	**8.49**	1.39
NCC	**0.99**	0.00	**0.97**	0.01	**0.93**	0.02

B. Real UHF signals

To evaluate the techniques with real signals, a PD generation test bench was set up. Fig. 3 shows the measurement scheme used and consists of a controlled voltage source of 0-40kV AC, a protection resistor ZL, a coupling capacitor, a quadrupole Zm, and a National Instruments acquisition and processing system with LabVIEW software. This last equipment is a PXIe-1088 model with a PXIe-5114 acquisition card with a sample rate of 250MS/s. With this system, PDs are acquired as electrical signals and used to verify PD activity. To measure UHF signals, a monopole antenna of 5-centimeter and ground plane is used. With this type of antenna, it is possible to obtain UHF signals from PD sources [12]. The UHF signals are acquired with a Tektronix Series 6 oscilloscope with a maximum sampling frequency of 25GS/s per channel and bandwidth up to 2.5GHz. In this work, a Device Under Test (DUT) is used to generate surface type PD which consists of a metal cylinder with a 10 mm thick plate of Poly (methyl methacrylate) (PMMA) and 30x30 centimeters. The antenna was positioned at one meter in a direct line of sight to the PD source. In Fig.4. images of the equipment and DUT for the experiment are shown. These are installed in the High Voltage Electrical Testing Laboratory (LEEAT) of the Universidad Interamerican de Panamá. To acquire the electrical PDs signals, an acquisition and processing algorithm was implemented in LabVIEW and for the UHF signals acquired by the oscilloscope, an algorithm was developed in MATLAB for each denoising technique.

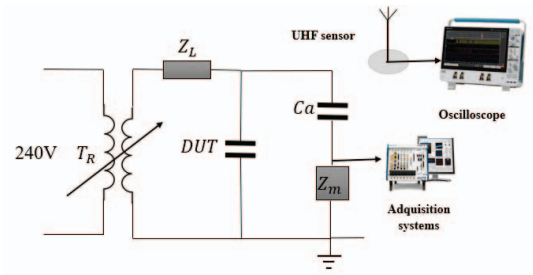


Fig. 3. Diagram of the experimental setup for the generation of UHF signals from a PD source.

Fig. 4. Images of the experimental setup. On the left, the monopole antenna, DUT, coupling capacitor, and transformer are shown. On the right in the upper corner, the sustained voltage source control and on the right, in the lower corner, the National Instrument acquisition system with the acquisition and processing algorithm in LabVIEW.

The generation process begins by establishing a voltage that results in a stable PD activity. In this case it was with a voltage of 11kV. Fig. 5 shows the Phase-Revolved Partial Discharge (PRPD) of the PD signals generated in the experiment and that shows the typical activity of superficial PD. The PRPD is created by obtaining the maximum amplitude of each PD pulse with the electrical measurement and its phase with respect to the sinusoidal electrical signal of the network at 60 Hz. These two characteristics per PD signal are plotted as two coordinates with respect to the sine wave as shown in Fig 5.

Once the active presence of PD was confirmed, the UHF signals were measured with the Oscilloscope, establishing a sampling frequency of 12.5GS/s. To verify that there is noise of various types, it was measured with the antenna, without the

presence of PD. Fig. 6 shows the background noise spectrum where it can be seen, in addition to white noise, spectrum peaks, which represent FM radio signals and GSM telecommunications, Wi-Fi, etc. In Fig. 7 a typical UHF signal in the experiment is shown, which presents an impulsive waveform with a duration between $100ns$ to $300ns$ with an approximate amplitude of 3 mV peak to peak. The amplitude and duration is variable since it depends on the intensity of the activity of the PDs.

In the experiment, 100 UHF signals were acquired for processing. Subsequently, they were processed with the three denoising techniques. Unlike the synthetic case, in a real environment, the original noise-free signals are not available, so the performance indices used with synthetic signals cannot be used. In this case, the Noise Rejection ratio (NRR) is used to evaluate denoising techniques as follows[19]:

$$NRR = 10(log\sigma^2 - log\hat{\sigma}^2)$$

Where σ and $\hat{\sigma}$ are the standard deviations of the UHF signals before and after denoising, respectively. The higher the NRR, the more the noise has been mitigated.

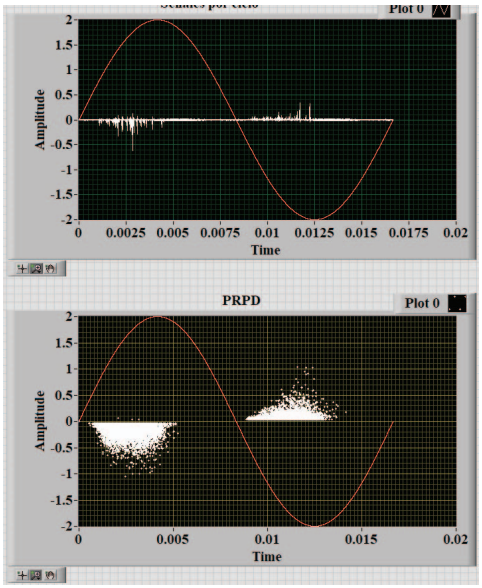


Fig. 5. PRPD result of PD signals from setup, which is typical of superficial PD sources.

TABLE 3 shows the results for the three denoising techniques. An average NRR is presented for the 100 signals. MSPCA yielded a much higher result than the other two techniques in the synthetic case. It is important to highlight that the operating parameters shown in TABLE 1 are used, however, they were varied with the purpose of improving the results without achieving anything significant.

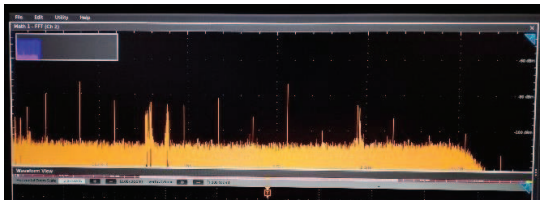


Fig. 6. Spectrum from 0 to 2.5GHz of the background noise without PD activity measured with the monopole antenna. It can be seen the base white noise plus the peaks of frequency modulated radio, television broadcasting, mobile telephones, and Wi-Fi.

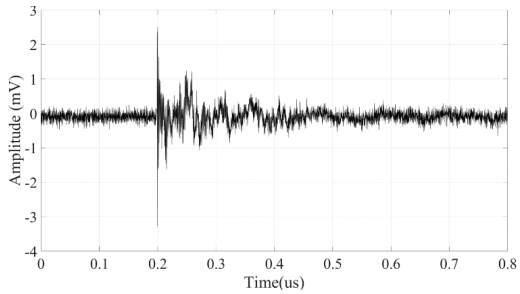


Fig. 7. Example of a UHF signal from PD measured by the antenna.

TABLE 3. RESULT OF DENOISING TECHNIQUES WITH REAL UHF SIGNALS. IN ADDITION TO THE AVERAGE, THE STANDARD DEVIATION IS SHOWN FOR THE 100 SIGNALS. THE BEST RESULT IS HIGHLIGHTED IN RED.

	WT	VMD	MSPCA
NRR	2.95±0.85	3.84±1.84	**4.54±0.93**

C. Discussion

In the two cases of synthetic and real UHF signals, respectively, MSPCA yields the best improvement values of SNR, NCC, and NRR, indicating its superiority with respect to WT and VMD. However, it is important to carry out a deeper analysis of these results. Fig. 8 shows the result of each technique for one of the measured UHF signals. In gray, the UHF signal with noise, and in black, after denoising. If we look at the resulting signals, VMD and MSPCA distort the signal to the point that they lower the initial peak, which is the wavefront. However, although WT has a worse NRR, it does not have a distortion effect as marked as VMD and MSPCA. Furthermore, in the process of noise mitigation, MSPCA has decreased this initial peak so much that another peak around 0.25 us is now higher than the initial one. And, on the other hand, although VMD does not have this effect, the distortion in the signal is more noticeable. In the tests with the algorithms, the parameters were varied to reduce this effect with VMD and MSPCA, however, the result was that the NRR deteriorated, and it was not significant on the signal. It is important to note that the initial peak of UHF signals is used to locate PD sources and a denoising algorithm must have a minimal impact on it in order not to affect this operation[8]. All these results imply the importance of carrying out an in-depth analysis of the effect of the processing techniques on the signals and the use of performance criteria, and in this specific case, on the waveform,

which is essential for subsequent classification and location tasks.

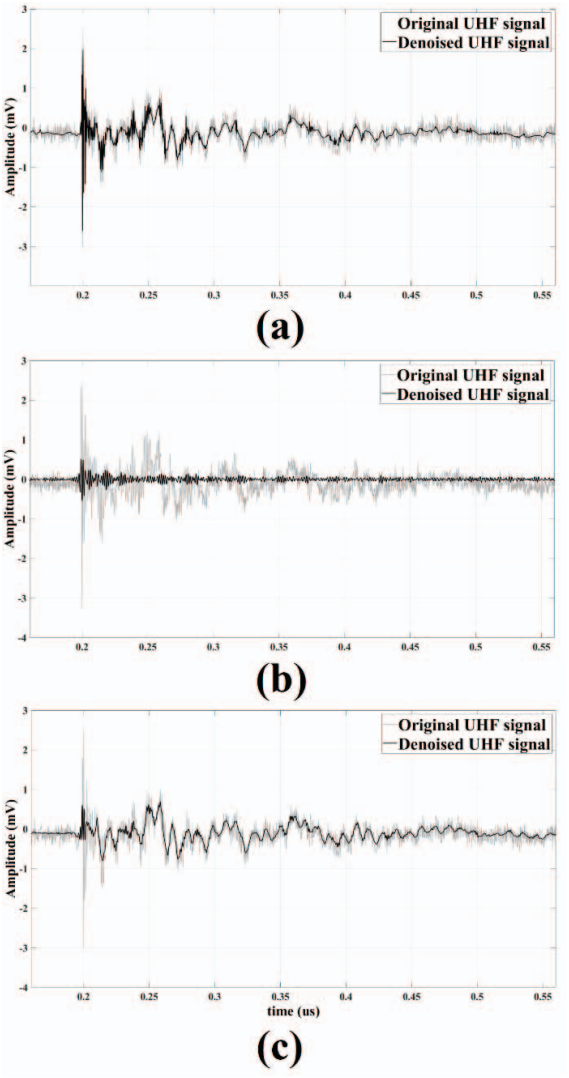


Fig. 8. Denoising result for each technique. In gray, the original UHF signal with noise and in black, the denoised signal. (a) WT, (b) VMD and (c) MSPCA.

IV. Conclusions

In this work, a comparative study of three denoising techniques WT, VMD and MSPCA for the denoising of UHF signals generated from a PD source has been carried out. First, the techniques were applied to synthetic signals created from mathematical models to establish the best operating parameters. Subsequently, an experimental set-up was performed to generate superficial PDs. The UHF signals emitted by this source were measured by a monopole antenna and acquired by an oscilloscope and subsequently processed with each technique. The results, for both synthetic and real UHF signals, indicated that MSPCA was superior to WT and VMD. However, in the case of real UHF signals, it was observed that MSPCA distorted the waveform, to such an extent that it attenuated the wavefront. The VMD technique also had a distortion effect on the signal, although not so accentuated in the wavefront. On the other hand, WT presented the lowest NNR, however, the distortion effect on the signal is much lower than for MSPCA and VMD.

From this study, we conclude that before applying a denoising technique, it is important to analyze its effect on the waveform and not only take performance criteria into account. If this is not considered, downstream tasks such as classification, identification, and localization that extract features from waveforms may be affected.

Acknowledgment

This work was supported by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) under Grants Fondecyt 1200055 and Fondef ID22I10153, and the UTFSM, under Grant PI_m_19_01; Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnologia e Innovacion (SENACYT) under Grant IDDSE19-007 and the Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá.

References

[1] W. Hauschild and E. Lemke, "High-Voltage test and measuring techniques," *High-Voltage Test and Measuring Techniques*, pp. 1–546, Sep. 2018, doi: 10.1007/978-3-319-97460-6/COVER.

[2] R. Arora and W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering," *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, Oct. 2011, doi: 10.1002/9780470947906.

[3] N. H. (Nazar H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. (Mohammad I. Qureshi, *Electrical insulation in power systems*. Marcel Dekker, 1998. Accessed: Jul. 29, 2022. [Online]. Available: https://www.routledge.com/Electrical-Insulation-in-Power-Systems/alik/p/book/9780824701062

[4] IEC, "IEC 60270: High voltage test techniques - partial discharge measurements," 2000. Accessed: Apr. 10, 2022. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/publication/1247

[5] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, "Partial discharges at dc voltage: Their mechanism, detection and analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 328–340, 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430401.

[6] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, and A. Contin, "A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: Properties and applications," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 203–215, 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430391.

[7] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, "Non-destructive insulation test techniques," *High Voltage Engineering Fundamentals*, pp. 395–459, Jan. 2000, doi: 10.1016/B978-075063634-6/50008-3.

[8] C. Boya, M. v. Rojas-Moreno, M. Ruiz-Llata, and G. Robles, "Location of partial discharges sources by means of blind source separation of UHF signals," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 2302–2310, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004482.

[9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, "IEC TS 62478," Geneva, Switzerland, Aug. 2016. Accessed: Apr. 07, 2022. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/publication/25740

[10] J. Long, X. Wang, W. Zhou, J. Zhang, D. Dai, and G. Zhu, "A Comprehensive Review of Signal Processing and Machine Learning Technologies for UHF PD Detection and Diagnosis (I): Preprocessing and Localization Approaches," *IEEE Access*, vol. 9. pp. 69876–69904, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077483.

[11] G. Robles *et al.*, "On the use of Vivaldi antennas in the detection of partial discharges," *Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*, pp. 302–305, 2013, doi: 10.1109/ICSD.2013.6619887.

[12] G. Robles, M. Sanchez-Fernandez, R. Albarracin Sanchez, M. v. Rojas-Moreno, E. Rajo-Iglesias, and J. M. Martinez-Tarifa, "Antenna parametrization for the detection of partial discharges," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 5, pp. 932–941, 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2223332.

[13] C. Boya, G. Robles, E. Parrado-Hernández, and M. Ruiz-Llata, "Detection of Partial Discharge Sources Using UHF Sensors and Blind Signal Separation," *Sensors 2017, Vol. 17, Page 2625*, vol. 17, no. 11, p. 2625, Nov. 2017, doi: 10.3390/S17112625.

[14] H. H. Sinaga, B. T. Phung, and T. R. Blackburn, "Partial discharge localization in transformers using UHF detection method," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 1891–1900, 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6396945.

[15] T. Jin, Q. Li, and M. A. Mohamed, "A Novel Adaptive EEMD Method for Switchgear Partial Discharge Signal Denoising," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 58139–58147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2914064.

[16] S. v. Vaseghi, "Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction: Fourth Edition," *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction: Fourth Edition*, pp. 1–514, Jan. 2008, doi: 10.1002/9780470740156.

[17] X. Zhongrong, T. Ju, and S. Caixin, "Application of complex wavelet transform to suppress white noise in GIS UHF PD signals," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1498–1504, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.899767.

[18] L. Yang, M. D. Judd, and C. J. Bennoch, "Denoising UHF signal for PD detection in transformers based on wavelet technique," *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, pp. 166–169, 2004, doi: 10.1109/CEIDP.2004.1364215.

[19] X. Zhang, J. Zhou, N. Li, and Y. Wang, "Suppression of UHF partial discharge signals buried in white-noise interference based on block thresholding spatial correlation combinative de-noising method," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 6, no. 5. pp. 353–362, 2012. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0378.

[20] Y. Wang, J. Wu, Z. Li, and Y. Yin, "Research on a practical de-noising method and the characterization of partial discharge UHF signals," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 5, pp. 2206–2216, Oct. 2014, doi: 10.1109/TDEI.2014.004187.

[21] J. Zhang, J. He, J. Long, M. Yao, and W. Zhou, "A new denoising method for UHF PD signals using adaptive VMD and SSA-based shrinkage method," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 7, 2019, doi: 10.3390/s19071594.

[22] C. Torrence and G. P. Compo, "Practical Guide Wavelet Analysis," *Bulletin of the American Meteorological society*, vol. 79, no. 1, pp. 61–78, 1998.

[23] H. Zhang, T. R. Blackburn, B. T. Phung, and D. Sen, "A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements part 1: WT de-noising algorithm," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, no. 1, pp. 3–14, 2007, doi: 10.1109/TDEI.2007.302864.

[24] D. L. Donoho, "De-Noising by Soft-Thresholding," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613–627, 1995, doi: 10.1109/18.382009.

[25] X. Ma, C. Zhou, and I. J. Kemp, "Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 3, pp. 446–457, 2002, doi: 10.1109/TDEI.2002.1007709.

[26] J. Kevric and A. Subasi, "The Effect of Multiscale PCA De-noising in Epileptic Seizure Detection," *Journal of Medical Systems*, vol. 38, no. 10, pp. 1–13, Oct. 2014, doi: 10.1007/S10916-014-0131-0/TABLES/8.

[27] K. Sharmila, E. H. Krishna, K. N. Reddy, and K. A. Reddy, "Application of multiscale principal component analysis (MSPCA) for enhancement of ECG signals," *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1540–1544, 2011, doi: 10.1109/IMTC.2011.5944301.

[28] K. Dragomiretskiy and D. Zosso, "Variational mode decomposition," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 3, pp. 531–544, 2014, doi: 10.1109/TSP.2013.2288675.

Occurrence of organochlorine compounds in biosolids from Wastewater Treatment Plants in Panama City

Presencia ambiental de compuestos organoclorados en biosólidos de Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales de la Ciudad de Panamá

Lloyd, Javier
Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales. Centro Experimental de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Panamá. Sistema Nacional de Investigación. Vicerrectoría de Investigación y Posgrado,Universidad de Panamá.
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
javier.lloyd@utp.ac.pa

Olmos, Jorge
Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales. Centro Experimental de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Panamá.
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
jorge.olmos@utp.ac.pa

González, Ana
Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales. Centro Experimental de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Panamá.
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
ana.gonzalez1@utp.ac.pa

Hernández, Cecilio
Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales. Centro Experimental de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Panamá.
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
cecilio.hernandez@utp.ac.pa

Deago, Euclides
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas. Universidad Tecnológica de Panamá. Sistema Nacional de Investigación
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
euclides.deago@utp.ac.pa

James, Arthur
Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Panamá. Sistema Nacional de Investigación
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
james.arthur@utp.ac.pa

Salazar, Elizabeth
Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales. Centro Experimental de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Panamá.
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
elizabeth.salazar@utp.ac.pa

Broce, Kathia
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas. Universidad Tecnológica de Panamá.
Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá
kathia.broce@utp.ac.pa

Abstract— Biosolids (treated sewage sludge) obtained because of wastewater treatment constitute a source of high beneficial value within the concept of circular economy. However, within its physicochemical characteristics associated with its high content of organic material, this matrix presents certain environmental risks due to the presence of environmental contaminants that can affect ecosystems and human health. In this sense, for this study Ultrasonic Extraction and Gas Chromatography with Mass Spectrometry were used to know the profile, distribution, and behavior of these chemical substances, with a view to carrying out future studies specifically. The results obtained show that, of the selected samples, the municipal sludge shows a presence of 79.49%, the hoteliers, 20.51% and the commercial ones, undetected, which demonstrates environmental contamination and future opportunity to carry out investigations for the determination selective and specific of xenobiotics in this type of samples. It is the first report focused on the study of identification of organic compounds in biosolids in Panama City.

Keywords—Contaminant distribution, environmental pollutants, organochlorine compounds, sewage sludge, Ultrasonic Extraction, Gas Chromatography

Resumen **— Los biosólidos (lodos residuales tratados) obtenidos producto del tratamiento de aguas residuales constituyen una fuente de alto valor benéfico dentro del concepto de economía circular. Sin embargo, dentro de sus características fisicoquímicas asociadas a su alto contenido de material orgánica, esta matriz presenta ciertos riesgos ambientales debido a la presencia de contaminantes ambientales que pueden afectar a los ecosistemas y a la salud humana. En tal sentido, para este estudio se empleó la Extracción Ultrasónica y la Cromatografía de Gases con la Espectrometría de Masas con el objetivo de conocer el perfil, distribución y comportamiento de estas sustancias químicas, de cara a la realización de futuros estudios de forma específica. Los resultados obtenidos muestran que, de las muestras seleccionadas, los lodos municipales muestran una presencia del 79.49 %, los hoteleros, el 20.51 % y los comerciales, no detectado, lo que demuestra contaminación**

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00100

ambiental y oportunidad a futuro de realización de investigaciones para la determinación selectiva y específica de xenobióticos en este tipo de muestras. Es el primer reporte enfocado al estudio de identificación de compuestos orgánicos en biosólidos en la Ciudad de Panamá.

Palabras claves —Distribución de contaminantes, contaminantes ambientales, compuestos organoclorados, lodo residual, Extracción Ultrasónica, Cromatografía de Gases

I. Introducción

En los últimos años, la ciudad de Panamá ha tenido un crecimiento económico e industrial significativo[1][2][3]. Dicho fenómeno ha ocasionado una mayor demanda en el recurso agua, causando con esto, un mayor grado de planificación en el diseño de las Plantas de tratamiento de Agua Residual[4]. Aunado a esto, se estima un aumento en la cantidad de población y utilización de productos químicos depositados en los biosólidos de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual, lo que ha provocado interés y preocupación entre la comunidad científica internacional. En este sentido, las plantas de tratamiento son el medio para la depuración y transporte de contaminantes, y producción de biosólidos[5].

Los biosólidos son un residuo obtenido en este proceso, un producto con interés de economía circular y un reservorio de sustancias contaminantes perturbadoras del medioambiente[6].

Los compuestos orgánicos (Figura 1) se clasifican en prioritarios y emergentes[7].

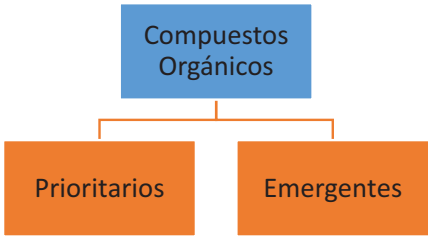


Fig. 1. Clasificación de compuestos orgánicos.

Estos compuestos orgánicos prioritarios y emergentes (conocidos también como compuestos xenobióticos) como plaguicidas, residuos de medicamentos, nanopartículas y retardantes de llama presentan características tóxicas y perjudiciales para la salud y el medioambiente, dentro de lo que podemos mencionar bioacumulación y biomagnificación en los ecosistemas a nivel de las cadenas tróficas, daños neurológicos, cáncer, disrupción endocrina y afección al sistema inmunitario[8].

Adicional al hecho de concentración ambiental de sustancias contaminantes en los biosólidos, este tipo de materiales posee una infinidad práctica de usos como disposición en rellenos sanitarios, aplicación en suelos con fines agrícolas y obtención de energía en forma de biogás [9], [10], [11].

Por tal motivo, para ganar conocimiento en el estudio de estos compuestos se emplean técnicas analíticas de extracción. Las técnicas de extracción más empleadas para biosólidos están la Extracción por Soxhlet, Extracción por líquidos presurizados (PLE), extracción por microondas (MAE) y la Extracción por Ultrasonido (UAE)[12]. Estas técnicas (Figura 2) se dividen en convencionales y de nueva generación.

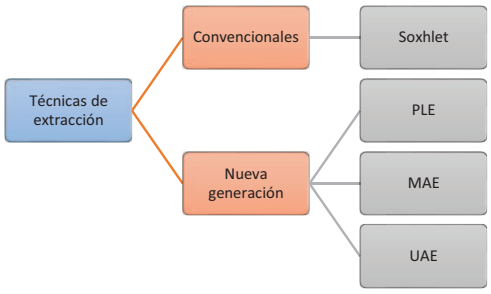


Fig 2. Clasificación de técnicas de extracción usadas en Biosólidos.

Las técnicas de extracción para que puedan cumplir con su propósito analítico necesitan de técnicas instrumentales especiales. La cromatografía de gases (GC) y la cromatografía líquida de alta eficiencia forman parte de las técnicas por excelencia para el análisis de estos contaminantes en los biosólidos[13].

De acuerdo con Mcnair (1998)[14], la Cromatografía de Gases representa una estrategia tecnológica para el estudio de contaminantes ambientales desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo. En lo sucesivo, las técnicas de extracción en combinación con las cromatográficas precisan del desarrollo de metodologías analítica que proporcionen resultados válidos y confiables.

Por tal motivo, el objetivo de este estudio es detectar la presencia a través de la cualificación de compuestos orgánicos de naturaleza persistente, causantes de evidencia de contaminación y evaluar la posibilidad de futuras investigaciones por medio del desarrollo cuantitativo de métodos multiresiduales para el conocimiento del perfil, cinética, transporte, dinámica y determinación de estas sustancias xenobióticas de interés sanitario.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. *Área de estudio*

Las localidades seleccionadas en esta investigación son Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales ubicadas en la Ciudad de Panamá, República de Panamá, las cuales cuentan con manejo y tratamientos de biosólidos[9][15].

B. *Muestreo*

La campaña de muestreo se realizó por seis meses dentro del período de octubre 2019 a marzo 2020 (Tabla 1). El muestreo fue del tipo probabilístico aleatorio. Se seleccionaron tres puntos distintos de muestreo de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de tipo comercial, hotelero y municipal. Los puntos de muestreo se codificaron como Planta de tratamiento I (Agua residual comercial), Plantas de tratamiento II (Agua residual hotelera) y Planta de tratamiento III (Agua Residual Municipal). La distribución de los puntos de muestreo se presenta en un mapa (Figura 3).

Tabla No. 1. Programación de colecta de muestras de biosólidos

Tipo de Planta de tratamiento	Cantidad de muestras	Fechas de muestreo
Planta de tratamiento I	6	Octubre 2019 Noviembre 2019 Diciembre 2019 Enero 2020 Febrero 2020 Marzo 2020
Planta de tratamiento II	6	
Planta de tratamiento III	18	

Fig.3. Distribución de puntos seleccionados de muestreo en la investigación.

Las muestras de biosólidos se georreferenciaron con un equipo de sistema de posicionamiento global, identificaron con etiquetas para evitar situaciones de faltas de codificación y colectaron siguiendo los requerimientos descritos en la metodología SM 1060[16] y en cumplimiento a lo indicado en el Reglamento técnico DGNTI-COPANIT 47-2000[17], siguiendo un procedimiento de cadena de custodia para conservar la trazabilidad y confiabilidad del proceso. Cada muestra se tomó en envases de vidrio ámbar con una pala pequeña metálicay se preservaron en hielo a una temperatura de 4 ºC hasta su llegada al laboratorio. Las muestras se almacenaron en un congelador a -20 ºC hasta su posterior análisis.

C. Reactivos y limpieza del material

Los reactivos empleados para la limpieza de los extractos como sulfato de sodio, silicagel, florisil, ácido sulfúrico y cobre fueron de grado analítico. Los solventes utilizados para la extracción diclorometano, hexano y ciclohexano fueron de grado cromatográfico.

Los reactivos se almacenaron a una temperatura de 20 a 25 ºC. El agua grado MilliQ y libre de orgánicos se utilizó para el lavado previo de la cristalería y envases de muestreo usados en los experimentos.

Para reducir las interferencias, la silicagel, el sulfato de sodio anhidro y florisil se calentaron térmicamente en una mufla a 300 ºC por doce horas y luego, se procedió a llevar a temperatura ambiente. La cristalería y envases de muestreo utilizados en el desarrollo de los experimentos y toma de muestras se lavaron con solución detergente grado analítico, agua grado laboratorio y acetona grado cromatográfico para evitar la contaminación cruzada.

D. Tratamiento de las muestras

Las muestras se secaron a 105 ºC por 24 horas y se trituraron en un mortero para su pretratamiento. Luego de esta etapa, se pesaron aproximadamente 10 g de muestra de biosólido y se extrajeron en un sistema de extracción ultrasónica a una potencia de 225 W, se utilizaron tres porciones de 25 mL de hexano-diclorometano 1:1 para el aislamiento de las muestras a analizar por 5 min. Posterior a ello, los extractos resultantes se decantaron y concentraron a 1 mL con nitrógeno gaseoso. Después de la concentración inicial, los extractos se purificaron en una columna de vidrio de 20 mm de longitud, configurada con sulfato de sodio, cobre granulado, florisil y silicagel tratada con ácido (Figura 4) para la eliminación de artefactos y sustancias interferentes. Por último, los extractos purificados se concentraron a un volumen mínimo de 1 mL y reconstituyeron en un proceso de cambio de solvente a ciclohexano para el análisis instrumental final por cromatografía de gases con espectrometría de masas.

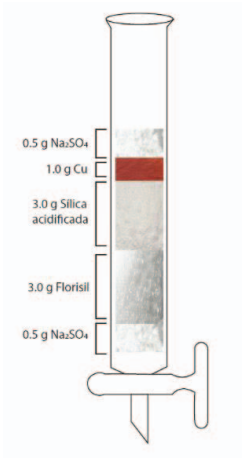


Fig. 4. Conformación de la columna de vidrio utilizada en la limpieza de los extractos.

E. Análisis instrumental

Las muestras fueron analizadas en un Cromatógrafo de Gases con Espectrometría de Masas Shimadzu GCSMS-QP2010 en modalidad de impacto electrónico (GC/MS-EI). El espectrómetro de masas se ajustó con perfluorterbutilamina (PFTA) utilizando el programa de auto sintonización de masas. Los compuestos detectados fueron separados en una columna capilar no polar (Rtx-5MS, espesor de película 0.25 µm, longitud de 30.0 m y diámetro interno de 0.25 mm). El horno se programó de 100.0 ºC por 1 min y de 100.0 ºC a 300.0 ºC a una tasa de calentamiento de 30.0 ºC por un tiempo de residencia de 17.5 min. El tiempo del programa total de la cromatografía fue de 25.17 min. El gas acarreador fue el Helio (He) de alta pureza a un flujo de columna de 1.50 mL/min, presión de 112.2 kPa, velocidad lineal de 45.6 cm/s y flujo de purga de 3.0 mL/min. El modo de inyección fue sin división (splitless), el volumen de inyección de 1 µL y una temperatura del inyector de 260 ºC. La temperatura de la línea de transferencia fue de 280 ºC y la temperatura de la fuente de ionización de 180 ºC. Los iones monitoreados en el Espectrómetro de Masas fueron 237 m/z, 272.00 m/z, 274 m/z y 297 m/z para la detección y cualificación de los compuestos en esta investigación.

F. Ánalisis de datos

La adquisición y análisis de los datos del GC/MS-EI se realizó usando el Software Shimadzu Lab Solution (GC-MS Solutions). Un análisis de varianza (ANOVA) y la elaboración de tablas y gráficas por medio de Microsoft Office 2016, se emplearon para evaluar las variaciones temporales de la presencia y detección de contaminantes ambientales en biosólidos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Detección de compuestos en muestras de biosólidos

Los iones seleccionados en la investigación para la detección y separación de compuestos en el GC-MS-EI fueron 237 m/z, 272 m/z, 274 m/z y 297 m/z, iones correspondientes a compuestos de naturaleza y característica organoclorada.

Las muestras de biosólido comercial (Figura 5), biosólido hotelero (Figura 6), biosólido municipal espesado (Figura 7), biosólido municipal deshidratado (Figura 8) y biosólido municipal digerido (Figura 9) evidencian la presencia de compuestos de interés ambiental con características y propiedades tóxicas para los ecosistemas y la salud humana a distintas proporciones. En el caso de la muestra de biosólido comercial, se puede ver la detección y separación de compuestos a nivel de intensidad mínima cercano al nivel Señal/Ruido (S/R), lo que evidencia que, para este tipo de muestra, no hay mayor incidencia ambiental.

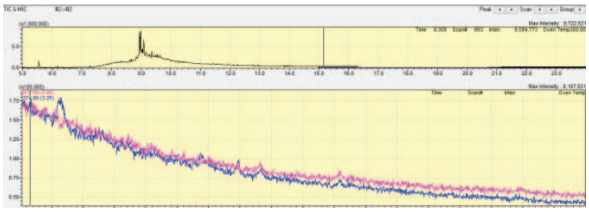
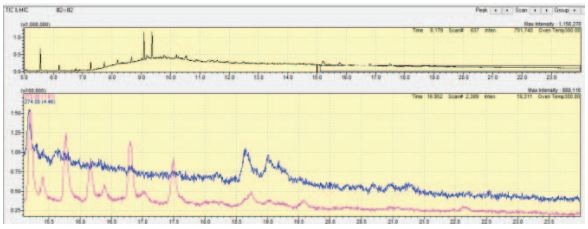


Fig.5. Cromatograma para la detección de contaminantes en una muestra de Biosólido Comercial.

En el caso de la muestra de biosólido hotelero, los niveles detectados y separados de compuestos xenobióticos son relevantes a un nivel superior a la relación Señal/Ruido (S/R), lo que demuestra una mayor repercusión al medio ambiente, en caso de una futura utilización para los fines descritos.



Fi. 6. Cromatograma para la detección de contaminantes en una muestra de Biosólido Hotelero.

Para la muestra de biosólido municipal espesado, se puede observar una detección diversa y más amplia de compuestos a diferencia del biosólido hotelero, lo que manifiesta un nivel superior de perfil ambiental y toxicológico.

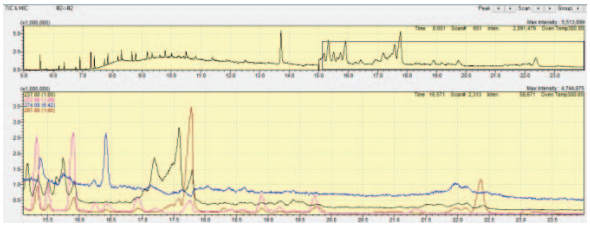


Fig. 7. Cromatograma para la detección de compuestos en una muestra de Biosólidos Municipal Espesado.

En el caso de la muestra de biosólido municipal estabilizado, se presenta un comportamiento cromatográfico similar desde el punto de vista de detección y separación al biosólido municipal espesado pero diferente al biosólido comercial y hotelero, lo que indica que, dependiendo del tipo de agua residual, el perfil ambiental tiende a presentar modificación.

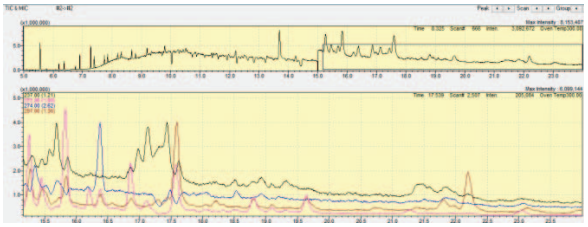


Fig. 8. Cromatograma para la detección de compuestos en una muestra de Biosólido Municipal Estabilizado.

Para la muestra de biosólido municipal digerido, la detección y separación de compuestos se ve reducida, teniendo esto una diferencia a las muestras de biosólido comercial, hotelero, municipal espesado y municipal estabilizado. Esto puede deberse a que el biosólido digerido tiene un proceso de tratamiento más riguroso, lo que conlleva a la reducción de la presencia de compuestos de interés ambiental.

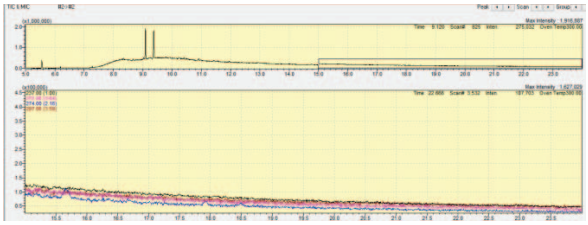


Fig. 9. Cromatograma para la detección de contaminantes en una muestra de Biosólido Municipal Digerido.

B. Distribución ambiental de contaminantes en biosólidos

En la tabla No. 2, se presenta la distribución ambiental de contaminantes en muestras de biosólidos, seleccionando como ion de interés, el 272 m/z, característico de especies organocloradas.

TABLA 2. DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES DETECTADAS EN MUESTRAS DE BIOSÓLIDOS.

Tipo de biosólido	**Tipo de PTAR**	**Ion seleccionado (m/z)**	**Cantidad de compuestos detectados**
Comercial	PTAR No. 1	272	0
Hotelero	PTAR No. 2		8
Municipal espesado	PTAR No. 3		13
Municipal estabilizado			15
Municipal digerido			3

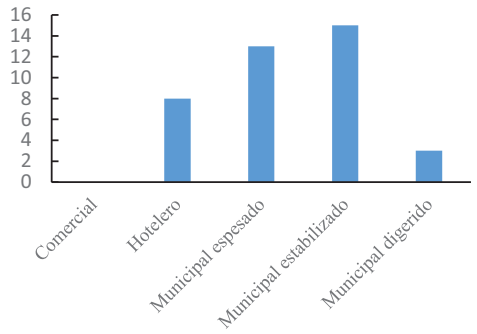


Fig 10. Distribución ambiental de contaminantes en biosólidos.

Los resultados presentados en la Tabla 2 y Figura 10 muestran una distribución amplia de contaminantes organoclorados diversa en las diferentes muestras, donde los biosólidos municipales estabilizado y espesado tienen mayor contribución ambiental, seguido del hotelero, luego el municipal digerido. El biosólido comercial no mostró evidencia de presencia de compuestos detectados.

Realizando un ANOVA de un factor (Tabla 3) se presentan los resultados por los meses que se realizó la investigación, considerando la diferencia del período de colecta de las muestras.

TABLA 3. RESULTADOS DE ANOVA DE UN FACTOR PARA LA DETECCIÓN DE COMPUESTOS ORGANOCLORADOS POR TIPO DE BIOSÓLIDOS.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Error cuadrático medio	F calculado	F crítico
Mes	4	328	82	7.39	2.87
Tipo de biosólido	20	222	11.1		

Dado que el F calculado es mayor que el F crítico, hay diferencias estadísticas significativas entre las bandas cromatográficas detectadas por tipo de biosólido. En resumen, esto explica que las especies cualificadas y separadas tienen un perfil diferente entre los tipos de biosólido y el mes que se efectuó la colecta, lo cual indica que, dependiendo de la estación del año, la aparición de sustancias contaminantes con interés ambiental y características de comportamiento de plaguicidas organoclorados como los regulados y priorizados por la Convención de Estocolmo[18].

IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha desarrollado y establecido un método analítico para el estudio de la ocurrencia ambiental de contaminantes presentes en biosólidos de Plantas de Tratamiento de Agua Residual de la Ciudad de Panamá, utilizando la Extracción Ultrasónica y la Cromatografía de Gases con Espectrometría de Masas en la modalidad de barrido de iones (SCAN). Los resultados obtenidos en los cromatogramas demuestran la presencia y ubicuidad de xenobióticos en este tipo de muestras, concretamente la presencia de sustancias organocloradas, siendo los biosólidos municipal espesados y estabilizados los que cuentan con mayor carga de contaminación, lo cual evidencia polución ambiental y regional.

A través de la presente metodología se pueden validar y cuantificar diferentes contaminantes prioritarios y emergentes de interés sanitario y ambiental, a medida que vayan surgiendo, por lo cual se hace necesario implementar este tipo de controles medioambientales en los biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Panamá, sobre todo si se piensa en una economía circular donde se les de utilidad.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el apoyo económico y financiero para la realización de esta investigación, a través del Sistema Nacional de Investigación (SNI), Proyecto Senacyt EIE-17-021 y el Proyecto Senacyt APY-NI2017b-08.

De igual manera, los autores agradecen al Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales del Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá y al Laboratorio de Calidad de Agua del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) por ofrecernos el espacio y el uso de sus instalaciones para la realización de los experimentos y obtención de los resultados en esta investigación.

VI. REFERENCIAS

[1] Ministerio de Economía y Finanzas de la República de Panamá, "Informe Económico y Social Anual 2017.

[2] Ministerio de Economía y Finanzas de la República de Panamá, "Informe Económico y Social Anual 2018".

[3] Ministerio de Economía y Finanzas de la República de Panamá, "Informe Económico y Social - Enero a febrero de 2019," pp. 1–14, 2019.

[4] M. S. Díaz-Cruz *et al.*, "Analysis of selected emerging contaminants in sewage sludge," *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 28, no. 11, pp. 1263–1275, 2009.

[5] N. Xiang *et al.*, "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and dechlorane plus (DP) in a conventional wastewater treatment plant (WWTP) in Shanghai: Seasonal variations and potential sources," *Sci. Total Environ.*, vol. 487, no. 1, pp. 342–349, 2014.

[6] L. Zeng *et al.*, "Current levels and composition profiles of emerging halogenated flame retardants and dehalogenated products in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants in China," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 21, pp. 12586–12594, 2014.

[7] N. Pérez-Lemus, R. López-Serna, S. I. Pérez-Elvira, and E. Barrado, "Analytical methodologies for the determination of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in sewage sludge: A critical review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 1083, pp. 19–40, 2019.

[8] W. Xu, X. Wang, and Z. Cai, "Analytical chemistry of the persistent organic pollutants identified in the Stockholm Convention: A review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 790, pp. 1–13, 2013.

[9] E. Deago, “Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020.

[10] A. De la Torre, E. Sverko, M. Alaee, and M. Á. Martínez, “Concentrations and sources of Dechlorane Plus in sewage sludge,” *Chemosphere*, vol. 82, no. 5, pp. 692–697, 2011.

[11] T. B. Chokwe, J. O. Okonkwo, L. L. Sibali, and E. J. Ncube, “An integrated method for the simultaneous determination of alkylphenol ethoxylates and brominated flame retardants in sewage sludge samples by ultrasonic-assisted extraction, solid phase clean-up, and GC-MS analysis,” *Microchem. J.*, vol. 123, no. July, pp. 230–236, 2015.

[12] O. Zuloaga *et al.*, “Overview of extraction, clean-up and detection techniques for the determination of organic pollutants in sewage sludge: A review,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 736, pp. 7–29, 2012.

[13] L. Martín-Pozo, B. de Alarcón-Gómez, R. Rodríguez-Gómez, M. T. García-Córcoles, M. Çipa, and A. Zafra-Gómez, “Analytical methods for the determination of emerging contaminants in sewage sludge samples. A review,” *Talanta*, vol. 192, no. June 2018, pp. 508–533, 2019.

[14] H. Mcnair and J. Miller, *Basic Gas Chromatography*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.

[15] D. Euclides and R. Marian, “Evaluation of the biochemical potential of methane from wastewater biosolids as a source of clean and sustainable energy,” *Proc. - 2019 7th Int. Eng. Sci. Technol. Conf. IESTEC 2019*, pp. 167–171, 2019.

[16] APHA, AWWA, and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. A.D. Eaton, et al. 2017, Baltimore, Meryland.

[17] Ministerio de Comercio e Industrias, “Reglamento técnico DGNTI-COPANIT 47-2000.Usos y disposición final de lodos,” *Gac. Of. la República Panamá*, no. 24115, 10 de agosto, 2000.

[18] H. P. on Tang, “Recent development in analysis of persistent organic pollutants under the Stockholm Convention,” *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 45, pp. 48–66, 2013.

Sustainability Actions towards Neutral Carbon Footprint Higher Education Institutions: A Systematic Review

Vivianne Álvarez
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Civil Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
vivianne.alvarez@utp.ac.pa

Zuri Rodríguez
Faculty of Civil Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
zuri.rodriguez@utp.ac.pa

Lissette Lirieth De León
Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
lissette.deleon1@utp.ac.pa

Miguel Chen Austin
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
miguel.chen@utp.ac.pa

Dafni Mora
Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimática (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
dafni.mora@utp.ac.pa

***Abstract*— According to the 2021 United Nations Climate Change Conference (COP26), higher education institutions (HEI) act as stakeholders in reducing climate change. Some authors identified the lack of general criteria for calculating HEI's Carbon Footprint (CF) and the impossibility of making equivalent comparisons of CF sustainability metrics between HEI in various contexts and countries due to the absence of measurement standardization. Despite several efforts by governments, professors, researchers, students, and communities to improve sustainability in HEI, universities continue to have significant CF. HEI's must quickly standardize and enhance their CF if they are to be taken as models by other institutions to meet the Sustainability Development Goals (SDGs). This paper presents a systematic review of sustainability actions towards a neutral CF in HEI through a bibliometric analysis. The results showed that the strategies most used to reduce the carbon footprint for sustainable management are based on the Greenhouse Protocol and the ISO 14064, according to the 20 universities analyzed.**

Keywords*— *carbon footprint, higher education institutions, sustainability, university

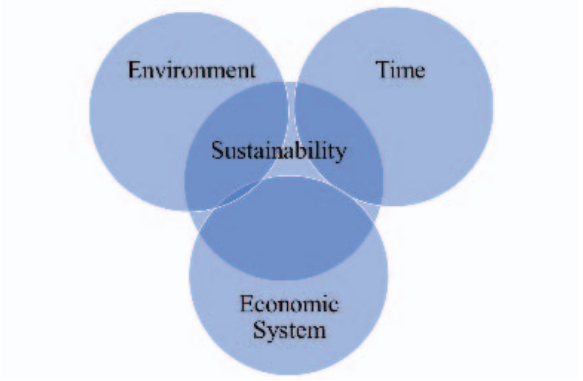
I. Introduction

Higher Education Institutions (HEI), through their substantive functions, aim to improve the use of resources to impact the university community and its surroundings [1].

HEIs play an indispensable role in achieving The United Nations Agenda that sets 2030 for Sustainable Development and its 17 Sustainable Development Goals (SDGs). The contribution of HEIs is given by all the SDGs encompassing the activities and functions of staff, researchers, students, and off-campus activities. None of the SDGs may be fulfilled without this sector [2]. UNESCO proposed a general framework for the recommendations regarding education, research, outreach, and community engagement, with the responsibility to incorporate all people in implementing the 2030 Agenda [3].

At the beginning of the 21st century, research in the areas of Sustainability in HEIs centered attention on issues of environmental management, ecological footprint, and greener campuses. Sustainability has been introduced with less forcefulness, including the social dimension and its integration with the economic and environmental dimensions [4].

Sustainability is widely used in public and private, national, and international scenarios. According to Vilches and Gil [5], the concept was identified in the early 1980s. With the increase in global problems related to said criterion, it has been understood that sustainability requires holistic, global approaches and transversality and is a concept without borders. Sustainability encompasses at least two dimensions: time and exchange within the use of natural resources and the economic system, as shown in Fig.1 [6].



978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00101

Fig 1. Dimensions of sustainability [6].

Carbon Footprint (CF) is defined by the IPCC Guidelines [7] as "a representation of the effect on climate in terms of the total amount of greenhouse gases (GHGs) that are produced, expressed in units of CO_2e as a result of the activities of an organization".

The universities are large organizations with a significant CF. The Authors [8] identified the lack of general criteria for calculating HEI's Carbon Footprint (CF) and the impossibility of making equivalent comparisons of CF sustainability metrics between HEI in various contexts and countries due to the absence of measurement standardization. According to Helmers et al. [9], a few universities worldwide consolidate and publish information about their CF, and not many have defined zero energy goals within their strategic plans.

There are international standards to calculate CF for organizations. The most widely used standard for carbon are the GHG Protocol Corporate Standard [10], ISO 14064–1 [11] and ISO/TR 14069 [12]. The methodologies more used in HEIs are ISO 14064 and the Greenhouse Gas (GHG) protocol [13].

Global University Rankings (GURs) developed after 2003 are existing systems that rate, and rank universities based on their performance, productivity, and quality.

The most GURs used to quantify the universities' relevance are Ranking Web of Universities or Webometrics Ranking of World Universities, TimesHigher Education (THE) World University rankings and TimesHigher Education (THE) Impacts Rankings, Quacquarelli Symonds (QS) World University Ranking, Academic Ranking of World Universities (ARWU), Global University Rankings, The Sustainability Tracking, Assessment and Rating System (STARS) and Scimago.

Regarding Green Campus and Sustainability in Universities around the world, in 2010 was launched by the University of Indonesia the UI GreenMetric [14]. A Comparative Analysis between Global University Rankings and Environmental Sustainability of Universities was realized [15] and the results demonstrate the need to integrate sustainability aspects into strategic plans. There is a low relationship between the two ranking systems. Just 12% of the universities in the Top 500 of the four GURs are also in the Top 500 of the UI GreenMetric ranking.

Despite several efforts by governments, professors, researchers, students, and communities to improve sustainability in HEI, universities continue to have significant CF. HEI's must quickly standardize and enhance their CF if they are to be taken as models by other institutions to meet the SDGs.

This paper presents a systematic review of sustainability actions towards a neutral CF in HEI through a bibliometric analysis.

II. Methodology

The methodology employed a bibliometric analysis based on two main aspects, sustainability ranking indicators and sustainability actions towards reducing the carbon footprint, to explore Higher Education Institutions' measures and characteristics to power sustainability culture.

A. Search Strategy

The literature search strategy implemented here consists of the combination of keywords and logical operators, i.e., and, or. The keywords chosen are terms related to the principal topic, sustainability in Higher Education Institutions' strategic plan to reduce the carbon footprint, and some secondary terms, synonyms of the previous terms. Table I displays the approach followed for the keyword formulation.

TABLE I. Approach implemented for keyword generation.

Who	*What*	*Where*	*When*	*Why*	*How*
HEI	Sustainability in higher education	University campus	Agenda 2030	Environmental management	Environmental policies
University	Sustainability university	Developing countries		Policies	GHG protocol
Green campus		Panama			Carbon footprint
	Institutional development plan	Latin America			Strategic plan
					Challenges

Two main databases were used to apply the search strategy, Google Scholar and Web of Science, and no age limit was applied. However, since over 2000 related documents were encountered, the analysis presented here only consists of the documents between the present and the past ten years. Other aspects of the higher education institutions are considered, such as economic income, the average number of students enrolled per year, position in international rankings, age, and how long sustainability plans are being implemented.

B. Bibliometric analysis

The bibliometric analysis is focused on the main aspect of this investigation, sustainability actions toward reducing the carbon footprint in Higher Education Institutions. The VOSviewer software, version 1.6.18, was used to create a map from the bibliographic database for a systematic presentation and analysis. The following keyword combinations with logical operators were used for the search: "actions AND universities", "actions AND universities AND sustainability", "sustainability AND higher education institutions OR university", "sustainability AND higher education AND emission". A total of 3616 references found were connected by co-occurrence of terms, extracted from the title and abstract fields, using the complete count method, with a minimum number of 10 occurrences. With a total of 13039 terms, 340 met the threshold. The software selected 60% most relevant (software default) and discarded terms related to countries resulting in 182 items. Secondly, another map was created through a keywords co-occurrence analysis using the full counting method. Of 5829 keywords, 250 met the threshold test with a minimum number of occurrences of 5. The keywords with the greatest total link strength will be selected. However, keywords referring to countries and incomplete words were not chosen, resulting in 160 items.

III. Results analysis and discussion

A. Sustainability Rankings Indicators

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. s hows the four global rankings with sustainability indicators; as a reference it shows the start year and country of origin. The QS World University Ranking was considered, since the 2022

edition it included the SGD. The QS consists of three indicators, which measure the environmental and social impact, taking the data from Elsevier SciVal to create an SDG Rating [16]. Note here that most entities behind the rankings remain in the northern hemisphere.

TABLE II. INDICATORS OF THE SUSTAINABLE GLOBAL UNIVERSITY RANKINGS.

Rankings	*Start year*	*Origin Country*	*Indicators*
UI GreenMetric	2010	Indonesia	Total of 51 indicators are distributed in the following areas: Environment & Infrastructure (SI) (15%) Energy & Climate Change (EC) (21%) Waste (WS) (18%) Water (WR) (10%) Transportation (TR) (18%) Education & Research (ED) (18%)
(QS) World University Rankings - SDG Ratings	2022	United Kingdom	Total citation count in the SDG field (30%) Average per paper Field-Weighted Citation Impact (FWCI) in the SDG Field (30%) Share of papers in top academic sources (40%)
(THE) Impacts Rankings	2019	United Kingdom	17 Sustainable Development Goal (100%)
STARS	2006	United States	Total of aprox. 64 indicators distributed in the following areas: Academics (AC) (58 pto = 28%) Engagement (EN) (41 pto = 20%) Operations (OP) (72 pto = 34%) Planning & Administration (PA) (34 pto = 16%) Innovation & Leadership (IN) (Bonus) (4 pto = 2 %)

The rankings are composed of several indicators distributed in general areas shown below. The selected rankings consider general aspects of the campus at the administrative, academic, and research levels. This last one is specifically evaluated by the SDG Rating of the QS, as mentioned; its indicators are based on research and publications of scientific articles and their impact.

The Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) is the only university in Panama that has been in the Green Metrics Ranking since 2013. According to the 2021 edition, UTP is ranked 797th position. The Institutional Development Plan (PDI) of the UTP has four sustainability indicators; however, considering all the sustainability rankings analyzed, more indicators need to be included. Regarding the QS World Ranking, an effort must be made to raise the visibility of the SDGs in research and, therefore, in scientific publications. Since 2020, the UTP started with a Diagnosis of the SDGs [17] in the university, and it is expected to involve the field of SDGs in various administrative, academic, and research processes.

B. Sustainability Actions in HEIs

This section compares and analyzes the total of 20 case studies of HEIs. Academic Institutions have undertaken various efforts to reduce their environmental impact on society, yet their role and commitment are pivotal to implementing sustainable alternatives.

Universities have commonly implemented different approaches, such as the Greenhouse protocol (GHG) or the ISO normative. This review did examine the methodologies implemented by HEIs as part of sustainability initiatives. The most common ones: Life cycle assessment (LCA) and the approaches: "bottom-up" or "process analysis" (PA), "top-down" or "Input-Output analysis" (IO), hybrid (LCA), and ISO 14064.

Table III shows that two universities implemented modifications to the methodologies followed; Tongji University used a different approach to the Process analysis and developed a methodology based on students' carbon footprint. The American University of Sharjah used a different approach to the Input – Output model but not all the financial data was available for the study.

The LCA technique was implemented in only two of the case studies. Following the GHG protocol recommendations, Keele and Haripur University identified their emissions into three scopes. Keele's average footprint is about 12 972 tons of CO2 equivalents and Haripur's 0.57889 tons of CO2 equivalents.

The University of Castilla – La Mancha described their process of greening its university campus by adopting the Input-Output model. The methodology used to assess the impact of the energy-saving measures introduced by the University and as a baseline scenario to consider how other policies could modify the outcome of the emissions. The University of Leeds implemented financial data to calculate the Carbon Footprint of products and services for the entire life cycle following the Input-Output model.

Clemson University was the only University that applied the consumption-based hybrid LCA suitable and more accurate to calculate organizational footprints because this approach gives a detailed, application-specific result. The major contributor to greenhouse gas emissions (41%) was electricity generation [18].

Five universities implemented the ISO 14064 standard to calculate GHG emissions. ISO 14064-1 is an international standard used for specifications and guidelines for quantification, statement of emissions, and removal of GHGs from both the private and the public sector; it also includes the design, development, and management requirements GHG inventory verification.[19]–[21].

Five universities adopted the Greenhouse protocol, but the literature studied did not explicitly provide what type of LCA method was approached. Not all these studies included Scope 3 emissions in their carbon footprint. And only four universities implemented a different approach.

These strategies contribute to improving the position in the global sustainability rankings. The universities analyzed are positioned in at least one of the four rankings mentioned. This indicates that the strategies employed to reduce the carbon footprint have a positive impact on the evaluation in the rankings.

Considering that the UI Green Metric Ranking is exclusive to sustainability, it was taken as a reference to see the position of the universities. As can be seen in Table III, the universities are better positioned than UTP. It is notable that four universities are in the top 100, and these universities have implemented strategies such as the Greenhouse protocol, LCA and ISO 14064 regarding greenhouse gases.

C. Results of bibliometric analysis

In the maps generated in the VOSViewer software, the labels' size represents the words' frequency or occurrence, and the colors represent the cluster in the network visualization and the timeline in the overlay visualization. Fig. 2 shows the map generated in the network visualization, resulting from the application sustainability in HEIs by analyzing the occurrence of terms in titles and abstracts. A total of seven clusters were obtained, which are a set of elements included in the map. The first cluster (red) describes teaching-learning topics in HEIs, referring to words such as "learning," "covid," "sustainable development goals," "evidence," "teaching," "course," "university students," "curricula," among others.

The second and third clusters (green and blue, respectively) are more directly related to actions towards achieving sustainability, such as strategies to follow or measurement indicators. For example, "emissions," "carbon footprint," "production," "quality," "energy consumption." The fourth cluster (yellow) seems to be more linked to the planning and responsible sector, as it gathers "sector," "planning," "campus sustainability," and "report." These results are similar to those presented in [22]. It predominates in the literature that the incorporation of sustainability in HEIs occurs more frequently in teaching activities, evaluation, and curriculum design, and then the focus on the implementation of actions, reporting, and classification. Moreover, Fig. 3 shows the same map, but in overlay visualization, i.e., by year of publication, with the most recent topics being SDGs, COVID-19, and carbon footprint (CF).

Furthermore, Fig. 4 is also a map by average year of publication generated from keyword co-occurrences. The average year of publication of articles using the word "sustainability" among their keywords is 2017. This indicates that currently, the global research trend is directly linked to sustainability but as a secondary related topic; main topics such as SDGs, COVID-19, circular economy, life cycle assessment, and online learning contribute to sustainability but do not work directly towards that. This is evidenced by the resulting maps in Fig. 3 and Fig. 4. In Fig. 3, it is observed that the word sustainability does not even appear with a significant co-occurrence in papers' titles and abstracts. However, these papers' main focus is on topics that contribute to sustainability, yet such a word is not included in the title and abstract. In contrast, researchers highlight the fact that their contributions do work towards sustainability by including such a word as part of the article keywords section (Fig. 4). Therefore, these network representations of the knowledge can serve as a tool to highlight the current main research trends, e.g., sustainable development goals, covid, waste, emission, production, and learning in Fig. 4, and the main reasons or basis for what these investigations take place (Fig. 3).

TABLE III. SUSTAINABILITY ACTIONS TO REDUCE CARBON FOOTPRINT IN THE HEIS

Nº	*UNIVERSITY*	*STRATEGY*	*Total tons CO2e*	*Green Metrics Position*	*Ref.*
1	Tongji University	Adopted the Greenhouse protocol- PA	3.84	NR	[23]
2	University of Castilla – La Mancha	Adopted the Greenhouse protocol- IO	23,000[a]	348	[24]
3	University of Leeds	Adopted Greenhouse protocol – IO	161,819	NR	[25]
4	International University of Catalonia (Universitat Internacional de Catalunya, UIC, in Catalan)	Curriculum modifications that promote a culture of sustainability	NR	472	[26]
5	Birla Institute of Technology and Science, Pilani	Umberto NXT Software - which is general Life Cycle Assessment (LCA) software.	16,500	NR	[27]
6	Keele University	Adopted the Greenhouse protocol- LCA	12, 972	58	[28]
7	Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald	Adopted Greenhouse protocol – only consider direct and indirect carbon dioxide (CO2) emissions	8,985	NR	[29]
8	University of Talca	Adopted Greenhouse protocol – ISO 14064	5472.89	NR	[30]
9	Jordan University of Science and Technology	Adopted the US eGrid- electric power-generated emissions data	18,000	205	[31]
10	Autonomous Metropolitan University	Adopted GHG protocol	2,956.3	214	[32]
11	Clemson University	Adopetd GHG protocol – HLCA	21,857	NR	[18]
12	Diponegoro University	Adopetd GHG protocol	16,345.83	30	[33]
13	University of Haripur	Adopted GHG protocol – LCA	0.57889	NR	[34]
14	Universitat Jaume I	Design a tool to calculate the Carbon Footprint of universities called, CO2UNV	0.30[b]	NR	[35]

15	Escuela Superior Politécnica del Litoral	Adopted the Greenhouse protocol-ISO 14064	0.356	240	[20]
16	The American University of Sharjah	Adopted the GHG Protocol – IO modifications	94,553.30	578	[36]
17	Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)	Adopted GHG Protocol-ISO 14064:2006	1,267.6	86	[19]
	Universidad Ean	Adopted GHG Protocol-ISO 14064:2006	205.62	NR	[19]
18	NED University of Engineering and Technology	Adopted GHG Protocol	21,500	639	[37]
19	Technological University of Pereira	Adopted GHG Protocol - ISO 14064-1: 2018	8, 969	66	[21]
20	San Francisco University of Quito	Adopted GHG Protocol	4,311.63	NR	[38]

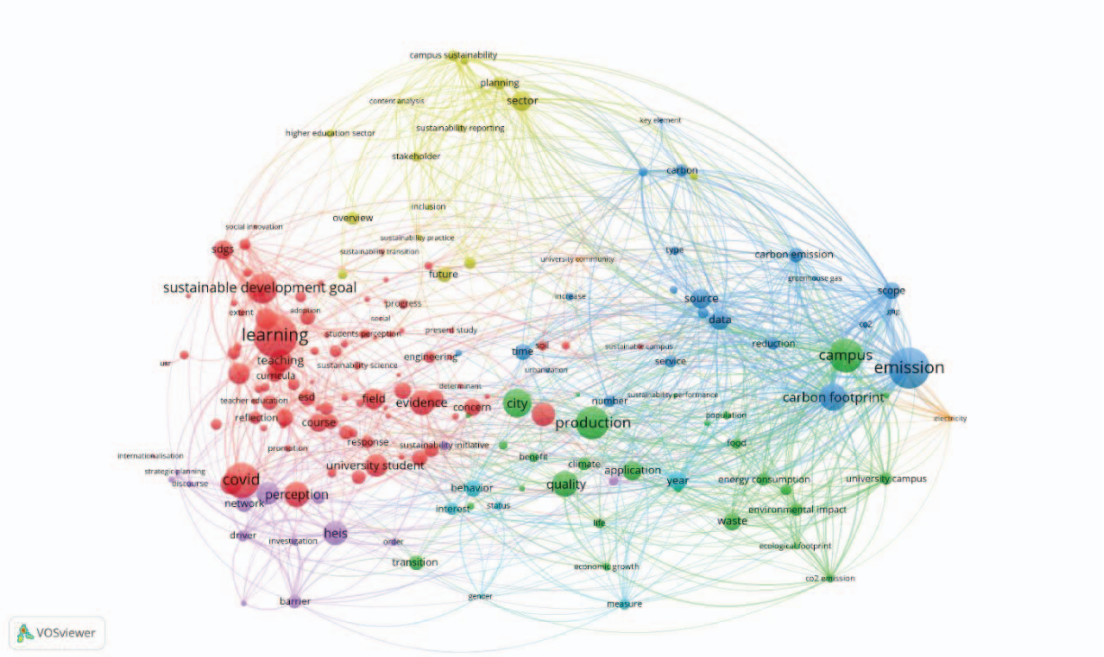


Fig 2. Network visualization of main terms in sustainability actions towards reducing the carbon footprint in Higher Education Institutions.

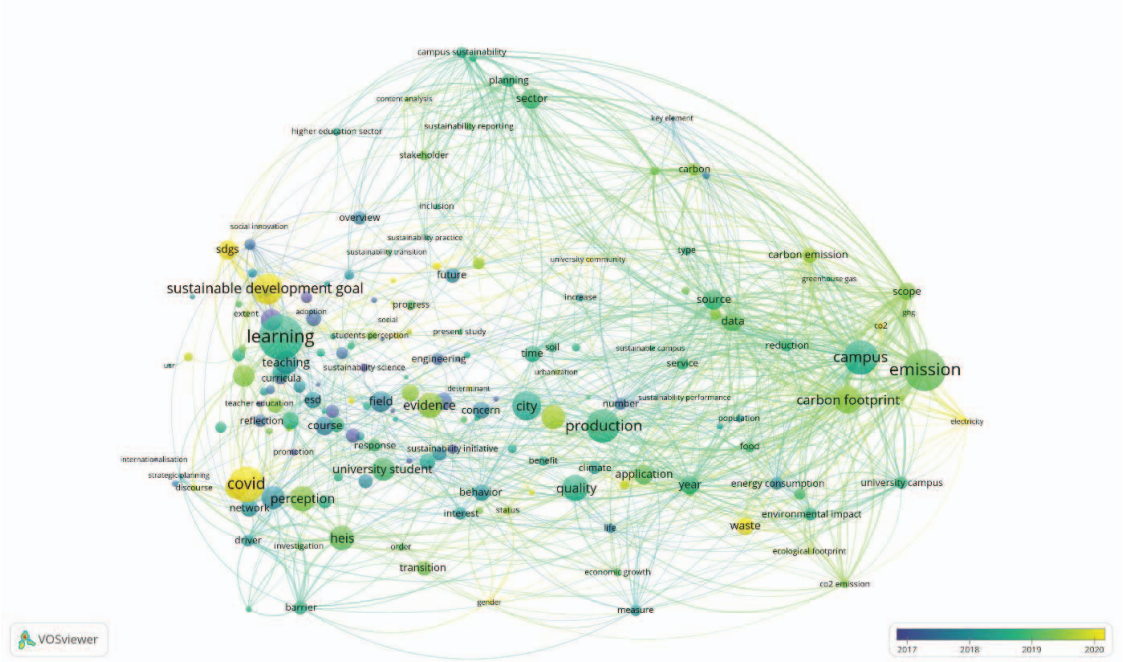


Fig 3. Overlay visualization by the average publication year of main terms in sustainability actions towards reducing the carbon footprint in Higher Education Institutions.

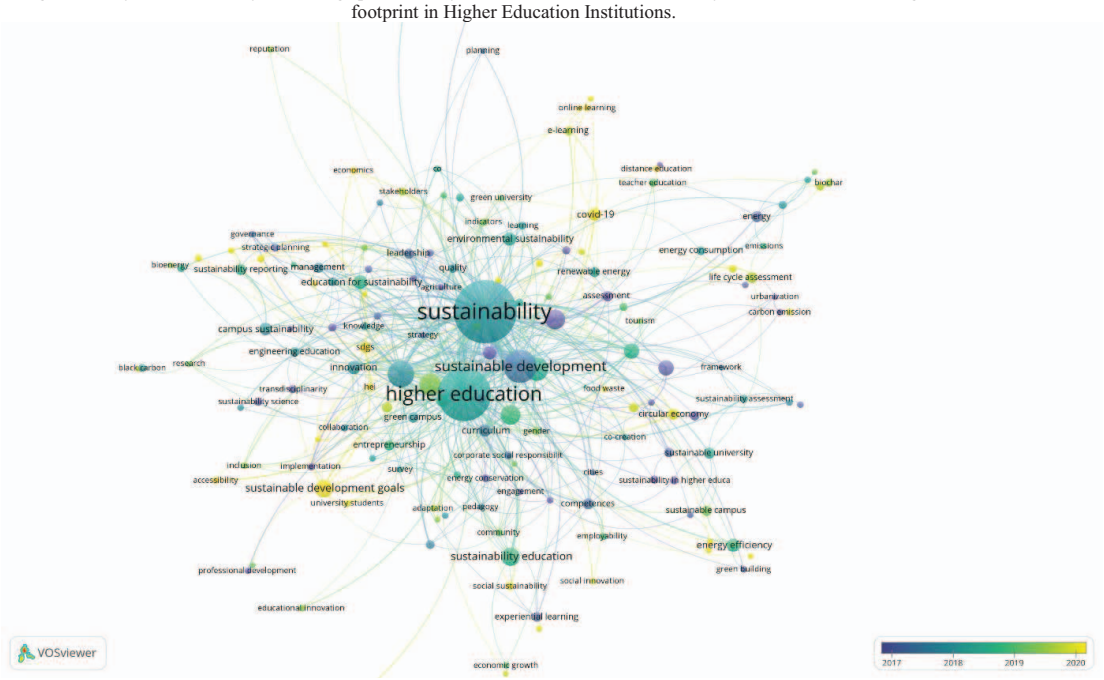


Fig 4. Overlay visualization by the average publication year of main terms in sustainability actions towards reducing the carbon footprint in Higher Education Institutions.

IV. Conclusions

Due to the 2030 global agenda, countries are required to make efforts toward sustainability and sustainable development goals. Higher Education Institutions (HEIs) are not excluded from this agenda. Therefore, sustainable management is becoming more critical within universities, and sustainability metrics such as international rankings give greater nationally and internationally visibility. As a result, student, faculty, and staff exchange and mobility towards enhancing academic collaboration is a priority. The results showed that the strategies most used to reduce the carbon footprint for sustainable management are based on the Greenhouse Protocol and the ISO 14064, according to the 20

universities analyzed. However, it is recommended to unify the criteria for the HEI.

The bibliometric analysis via the VOSviewer software was carried out with keywords linked to sustainability in higher education and related actions. Based on this, universities focus on incorporating sustainability issues through teaching and learning mainly. This indicates that implementing courses with sustainable themes is important to achieve such goals. However, as expected, actions mainly focused on "emissions" and "carbon footprint" are also implemented. On the other hand, it was found that "sustainability" as such is not directly a current trend, but rather studies focus on more specific issues that can fulfill it.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Research Group Energy and Comfort in Bioclimatic Buildings (ECEB, https://eceb.utp.ac.pa/) Faculty of Mechanical Engineering (https://fim.utp.ac.pa/) within the Universidad Tecnológica de Panamá (https://utp.ac.pa/) for their collaboration. This research was funded by Sistema Nacional de Investigación (SNI) and a Panamanian Institution Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT, https://www.senacyt.gob.pa/) under the projects code FIED22-09.

REFERENCES

[1] G. Sen, H. W. Chau, M. A. U. R. Tariq, N. Muttil, and A. W. M. Ng, "Achieving sustainability and carbon neutrality in higher education institutions: A review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, pp. 1–27, 2022, doi: 10.3390/su14010222.

[2] SDSN Australia/Pacific, "Getting started with the SDGs in universities," Andrew Wilks, 2017. [Online]. Available: www.acts.asn.au

[3] UNESCO, *Knowledge-driven actions: Transforming higher education for global sustainability*. 2022. [Online]. Available: http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en

[4] S. Albareda Tiana, M. Fernández Morilla, J. M. Mallarach Carrera, and S. Vidal Ramèntol, "Barreras para la sostenibilidad integral en la Universidad," *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 73, pp. 253–272, 2017, doi: 10.35362/rie730301.

[5] A. Vilches and D. Gil Pérez, "Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas?," *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 69, no. 1, pp. 39–60, 2015, doi: 10.35362/rie691152.

[6] Geoffrey Heal, *Valuing the Future: Economic Theory and Sustainability*. 1998.

[7] IPCC Guidelines, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories," 2006. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html (accessed Jul. 03, 2022).

[8] K. Valls-Val and M. D. Bovea, "Carbon footprint in Higher Education Institutions: a literature review and prospects for future research," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 23, no. 9. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 2523–2542, Nov. 01, 2021. doi: 10.1007/s10098-021-02180-2.

[9] E. Helmers, C. C. Chang, and J. Dauwels, "Carbon footprinting of universities worldwide: Part I—objective comparison by standardized metrics," *Environ Sci Eur*, vol. 33, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12302-021-00454-6.

[10] World Resources Institute, "The Green Gas Protocol," 2015.

[11] "ISO 14064-1:2018 Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals," 2018.

[12] "ISO/TR 14069:2013 Greenhouse gases — Quantification and reporting of greenhouse gas emissions for organizations — Guidance for the application of ISO 14064-1," 2013.

[13] P. Yañez, A. Sinha, and M. Vásquez, "Carbon footprint estimation in a university campus: Evaluation and insights," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/SU12010181.

[14] UI GreenMetric, "UI GreenMetric World University Rankings," *Background of the Ranking*, 2022. https://greenmetric.ui.ac.id/ (accessed Mar. 05, 2022).

[15] M. Muñoz-Suárez, N. Guadalajara, and J. M. Osca, "A comparative analysis between global university rankings and environmental sustainability of universities," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 14, pp. 1–19, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12145759.

[16] QS Quacquarelli Symonds Limited, "QS World University Rankings," 2022. https://www.topuniversities.com/university-rankings (accessed Jul. 30, 2022).

[17] SDSN Australia/Pacific, "Cómo empezar con los ods en las universidades- Una guía para las universidades, los centros de educación superior y el sector acaddémico," 2017.

[18] R. Clabeaux, M. Carbajales-Dale, D. Ladner, and T. Walker, "Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach," *J Clean Prod*, vol. 273, p. 122600, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122600.

[19] A. M. Osorio *et al.*, "Towards Carbon Neutrality in Higher Education Institutions: Case of Two Private Universities in Colombia," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14031774.

[20] N. P. Criollo, A. D. Ramirez, D. A. Salas, and L. R. Andrade, "THE ROLE OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS REGARDING CLIMATE CHANGE: THE CASE OF ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL AND ITS CARBON FOOTPRINT IN ECUADOR WBCSD World Business Council for Sustainable Development WRI World Reources Institute WWTP Waste Water Treatment Plant," 2019.

[21] M. Varón-Hoyos, J. Osorio-Tejada, and T. Morales-Pinzón, "Carbon footprint of a university campus from Colombia," *Carbon Manag*, vol. 12, no. 1, pp. 93–107, 2021, doi: 10.1080/17583004.2021.1876531.

[22] P. M. Hernández-Diaz, J. A. Polanco, M. Escobar-Sierra, and W. Leal Filho, "Holistic integration of sustainability at universities: Evidences from Colombia," *J Clean Prod*, vol. 305, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127145.

[23] X. Li, H. Tan, and A. Rackes, "Carbon footprint analysis of student behavior for a sustainable university campus in China," in *Journal of Cleaner Production*, Nov. 2015, vol. 106, pp. 97–108. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.084.

[24] N. Gómez, M. Á. Cadarso, and F. Monsalve, "Carbon footprint of a university in a multiregional model: the case of the University of Castilla-La Mancha," *J Clean Prod*, vol. 138, pp. 119–130, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.009.

[25] J. Townsend and J. Barrett, "Exploring the applications of carbon footprinting towards sustainability at a UK university: reporting and decision making," *J Clean Prod*, vol. 107, pp. 164–176, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.004.

[26] S. Albareda-Tiana, S. Vidal-Raméntol, and M. Fernández-Morilla, "Implementing the sustainable development goals at University level," *International Journal of Sustainability in Higher Education*, vol. 19, no. 3, pp. 473–497, Feb. 2018, doi: 10.1108/IJSHE-05-2017-0069.

[27] K. S. Sangwan, V. Bhakar, V. Arora, and P. Solanki, "Measuring Carbon Footprint of an Indian University Using Life Cycle Assessment," *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 475–480, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCIR.2017.11.111.

[28] Y. Gu *et al.*, "Environmental footprint assessment of green campus from a food-water-energy nexus perspective," in *Energy Procedia*, 2018, vol. 152, pp. 240–246. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.109.

[29] E. Udas, M. Wölk, and M. Wilmking, "The 'carbon-neutral university' – a study from Germany," *International Journal of Sustainability in Higher Education*, vol. 19, no. 1, pp. 130–145, 2018, doi: 10.1108/IJSHE-05-2016-0089.

[30] P. Yañez, A. Sinha, and M. Vásquez, "Carbon footprint estimation in a university campus: Evaluation and insights," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/SU12010181.

[31] H. Abu Qdais, O. Saadeh, M. Al-Widyan, R. Al-tal, and M. Abu-Dalo, "Environmental sustainability features in large university campuses: Jordan University of Science and Technology (JUST) as a model of green university," *International Journal of Sustainability in Higher Education*, vol. 20, no. 2, pp. 214–228, May 2019, doi: 10.1108/IJSHE-06-2018-0102.

[32] R. Mendoza-Flores, R. Quintero-Ramírez, and I. Ortiz, "The carbon footprint of a public university campus in Mexico City," *Carbon Manag*, vol. 10, no. 5, pp. 501–511, Sep. 2019, doi: 10.1080/17583004.2019.1642042.

[33] L. N. Munene, "Reducing carbon emissions: Strathmore University contributions towards sustainable development in Kenya,"

AFRICAN JOURNAL OF BUSINESS ETHICS, vol. 13, no. 1, pp. 1–11, Jul. 2019, doi: 10.15249/13-1-173.

[34] I. Ullah, Islam-Ud-Din, U. Habiba, U. Noreen, and M. Hussain, "Carbon footprint as an environmental sustainability indicator for a higher education institution," *International Journal of Global Warming*, vol. 20, no. 4, pp. 277–298, 2020, doi: 10.1504/IJGW.2020.107147.

[35] K. Valls-Val and M. D. Bovea, "Carbon footprint assessment tool for universities: CO2UNV," *Sustain Prod Consum*, vol. 29, pp. 791–804, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2021.11.020.

[36] F. Samara, S. Ibrahim, M. E. Yousuf, and R. Armour, "Carbon Footprint at a United Arab Emirates University: GHG Protocol," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14052522.

[37] A. Mustafa, M. Kazmi, H. R. Khan, S. A. Qazi, and S. H. Lodi, "Towards a Carbon Neutral and Sustainable Campus: Case Study of NED University of Engineering and Technology," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020794.

[38] "Repositorio Digital USFQ: Huella de carbono de la Universidad San Francisco de Quito año 2017 y plan de mitigación de emisiones de CO2-eq." https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7594?mode=full (accessed Jul. 30, 2022).

Relationship between precipitation and variations in the water table during the rainy season in the Zaratí river sub-basin

Relación de la precipitación con las variaciones de los niveles freáticos durante la época lluviosa en la subcuenca del río Zaratí

Job Osvaldo Noel Amaya
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
job.noel@utp.ac.pa

Cristel Julissa Cedeño Martinez
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
cristel.cedeno@utp.ac.pa

Kleveer Espino
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
kleveer.espino@utp.ac.pa

Xavier Sanchez
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
xavier.sanchez2@utp.ac.pa

José Fábrega
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

***Abstract*—The growing need to have water for various uses, coupled with inefficient management, raises the alarm of a possible overexploitation of the resource, where long-term water resource assurance is urgent. This research seeks to determine relationships between precipitation and its impact on variations in groundwater levels in aquifers, to understand these processes, and determine recharge zones in the basin for the conservation and assurance of hydrogeological resources. For this study, we focus on the sub-basin of the Zaratí River, located in the province of Coclé. Precipitation stations were installed in strategic areas of the basin to measure rainfall, and monthly campaigns were carried out to measure groundwater levels in the study wells. The results show that both for the middle and upper part, as well as for the lower part of the basin, there is a direct relationship between precipitation and variations in groundwater levels. Likewise, some effects of precipitation are not directly influenced in the variations of some wells, however, this is possibly due to the extraction of groundwater from active wells in the area, as well as due to the use and type of soil in the region.**

Keywords— Precipitation, water table, groundwater, water resources.

***Resumen* — La creciente necesidad de contar con agua para diversos usos, aunado a un manejo ineficiente de esta, enciende las alarmas de una posible sobreexplotación del recurso, en donde urge el aseguramiento del recurso hídrico a largo plazo. Esta investigación busca determinar relaciones entre la precipitación y su impacto en las variaciones de los niveles freáticos en acuíferos libres, con la finalidad de poder comprender estos procesos, y determinar zonas de recarga en la cuenca para la conservación y aseguramiento del recurso hidrogeológico. Para este estudio nos enfocamos en la subcuenca del río Zaratí, ubicada en la provincia de Coclé. Se instalaron estaciones medidoras de precipitación en zonas estratégicas de la cuenca, y se realizaron campañas mensuales para la medición de niveles freáticos en los pozos de estudio. Los resultados muestran que tanto para la parte media y alta, como para la parte baja de la cuenca, existe una relación directa de la precipitación con las variaciones de los niveles freáticos. Igualmente, algunos efectos de la precipitación no se ven directamente influenciados en las variaciones de algunos pozos, sin embargo, esto se da posiblemente debido a la extracción de agua subterránea de pozos activos en la zona, así como también producto del uso y tipo de suelo en la región.**

Palabras claves— Precipitación, nivel freático, agua subterránea, recursos hídricos.

I. Introducción

Panamá es un país con un recurso hídrico invaluable, abundante, capaz de suplir las necesidades hídricas de todo el país, y con una precipitación promedio anual de 2924 mm y una disponibilidad hídrica anual de 119.5 mil millones de m^3 [1]. Sin embargo, existe una complejidad en el manejo, distribución; y en los últimos años, en los patrones de precipitación, lo que dificulta la buena gestión de los recursos hídricos. Para solventar dichas necesidades, en zonas donde el acceso a fuentes de agua superficial es escaso, han surgidos iniciativas de explorar otros recursos disponibles en el país como lo son las aguas subterráneas. Sin embargo, esta exploración del potencial hidrogeológico ha sido desorganizada, llevada a cabo para suplir la demanda momentánea de una región, sin miras al posible impacto a futuro de la sobreexplotación del recurso [2][3].

Debido a esta problemática, nace la intención de estudiar y recabar la información disponible que sirva para el mejoramiento del manejo de los recursos hídricos, con especial énfasis en las aguas subterráneas y en la región de Panamá conocida como el Arco Seco. En este estudio, buscamos identificar posibles relaciones que existen entre la precipitación y las variaciones de los niveles freáticos, con el fin de poder conservar mejor las zonas de recarga de los

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00102

acuíferos, y concientizar a la población de la importancia de la conservación de las cuencas en donde habitan.

Este estudio enmarcado en la subcuenca del río Zaratí (SRZ), busca comprender mejor los procesos hidrológicos de esta subcuenca. Esperamos que los resultados de este logren impactar de forma positiva el manejo de los recursos hídricos en la región, para que sirva como base para futuras réplicas en otras zonas del país.

II. Metodología

A. Sitio de estudio

La subcuenca del río Zaratí (SRZ) se ubica en la cuenca del río Grande (Ver Fig.1), la cual abarca la provincia de Coclé, en Panamá. Posee una precipitación promedio de 1795 mm [4], y donde predominan dos estaciones, la seca que comprende los meses de diciembre a abril, y la lluviosa que comprende los meses de abril a noviembre. La SRZ posee un área de 168.8 km^2, y su río principal, el río Zaratí, cuenta con una longitud de 38.15 km [5].

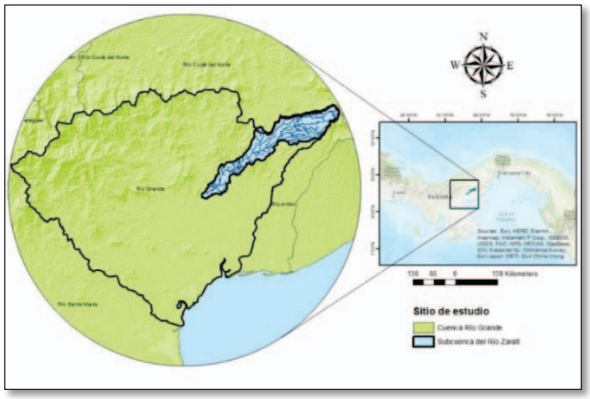


Fig. 1. Ubicación geográfica de la Subcuenca del río Zaratí dentro de la Cuenca del Río Grande de Panamá.

B. Procedimiento

Para determinar la relación que existe entre la precipitación y los niveles freáticos, se instalaron 4 pluviómetros marca Odyssey, modelo "Tipping bucket Rain Gage", en la SRZ para la medición de la precipitación. Estos pluviómetros utilizan una interfaz de registro de datos, donde se registran precipitaciones en función del tiempo, generando datos reales de intensidad de lluvia. Los pluviómetros se ubicaron en zonas estratégicas para lograr tener una representatividad espacial de la precipitación en toda la cuenca: i) Paso Ancho (Parte baja de la SRZ), ii) Sonadora (Parte media de la SRZ) y iii) los pluviómetros colocados en Sofre y Altos de la Estancia (Parte alta de la SRZ) (Ver Fig. 2). Para la descarga de la data, se utilizó el software Odyssey a través del registrador de datos instalado en la estación pluviométrica.

Para las mediciones de los niveles freáticos, se hacen campañas mensuales que miden puntualmente el nivel del agua en los pozos utilizados (Ver Fig. 2). Para ello se ubicaron pozos inactivos en la cuenca del río Zaratí, tratando de abarcar las partes altas, medias y bajas de la cuenca, y así poder tener una mejor idea de las relaciones de la precipitación con los niveles freáticos. Las mediciones de los niveles freáticos se llevan a cabo utilizando una sonda de nivel de la marca Solinst, con una profundidad máxima de 100 metros.

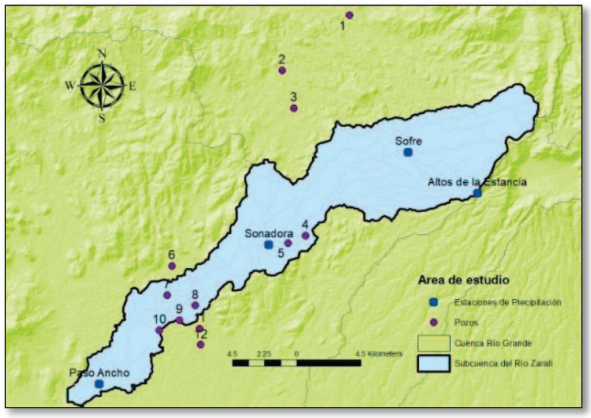


Fig. 2. Ubicación de pozos de monitoreo (en rojo) y pluviómetros (en azul) en la subcuenca del río Zaratí utilizados para este estudio.

III. Resultados

Precipitación. Las estaciones de precipitación están ubicadas estratégicamente para monitorear la distribución de la lluvia que ocurre en la SRZ, específicamente durante el comienzo de la temporada lluviosa (marzo-junio 2022).

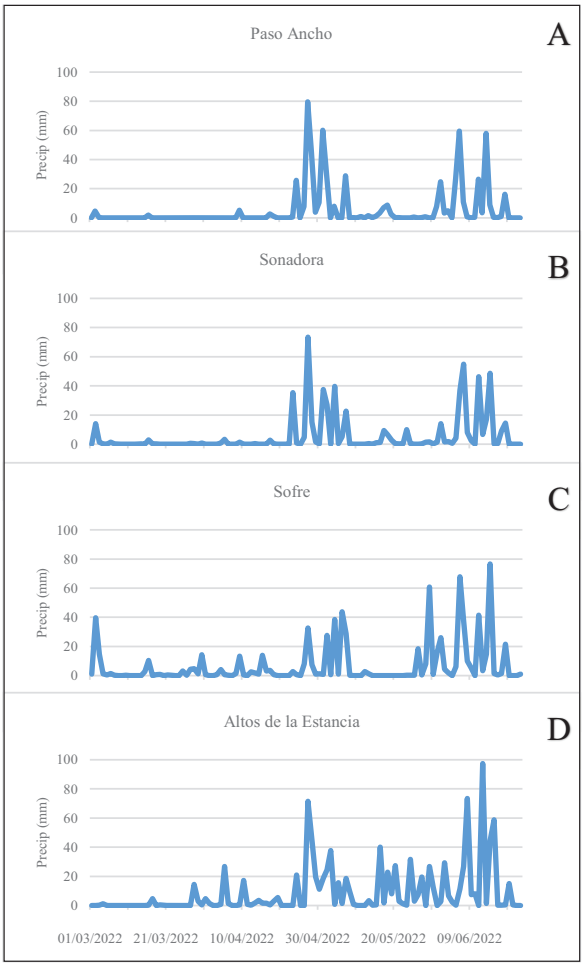


Fig. 3. Comportamiento de la precipitación diaria en las estaciones pluviométricas de la SRZ de enero a junio de 2022. Las figuras A a la D van de la parte baja y media (Paso Ancho y Sonadora) a la parte alta (Sofre y Altos de la Estancia) de la SRZ.

Los resultados muestran que en las estaciones ubicadas en la parte baja y media de la cuenca (Ver Fig. 3A y 3B), para los meses de marzo y abril registraron nulas o pocas precipitaciones, con picos bajos de lluvias, en comparación con las estaciones de la parte media y alta de la cuenca (Ver Fig. 3C y 3D), en donde hubo un ligero incremento de lluvias alcanzando picos de precipitación hasta los 26.8 mm para la estación Altos de la Estancia, cuyos registros de precipitación marcan el comienzo de la temporada lluviosa.

Se puede observar que, para comienzos de mayo, hay una pequeña reducción de la precipitación, pero luego, para finales mayo y junio, se observa que el patrón de precipitación cambia y empieza a ocurrir una mayor precipitación en la parte alta de la cuenca, registrando picos de 76 y 94 mm de lluvia para las estaciones de Sofre y Altos de la Estancia en comparaciones con registros por debajo de los 60 mm en las estaciones ubicadas en la parte baja de la SRZ. Actualmente, se continua el monitoreo para evaluar el comportamiento en toda la temporada lluviosa.

Nivel freático. Los resultados muestran que los pozos de la parte alta y media tienen un patrón definido a partir de abril, (Ver Fig. 4) con un aumento de la profundidad de los niveles freáticos. Aunado a esto, los pozos de la parte alta y media presentan dos tipos de variaciones leves en los niveles freáticos. Para los pozos 1, 2 y 4 se puede observar que, para abril, hay un aumento en la profundidad del nivel freático en comparación con marzo. Para los meses de mayo y junio, hay una disminución continua con respecto al mes de abril. Sin embargo, para los pozos 3 y 5, existe una disminución continua de las mediciones de profundidad de los niveles freáticos desde marzo hasta junio.

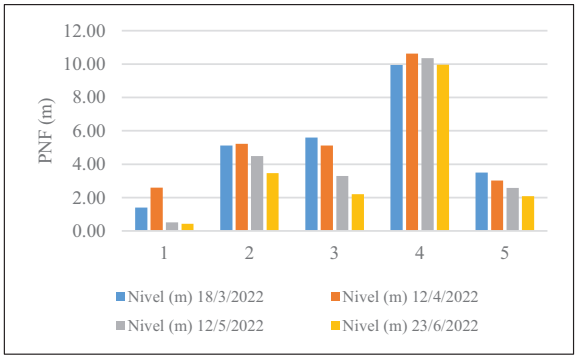


Fig. 4. Profundidad a nivel freático (PNF) en las mediciones puntuales de los pozos en la parte alta y media de la SRZ. Los números 1 al 5 corresponden a la nomenclatura utilizada para la identificación de los pozos de monitoreo en la Figura 2.

Los resultados de los pozos, para la parte baja de la SRZ muestran un claro patrón a seguir para los meses de marzo y abril, con excepción del pozo 8, observándose un aumento de la profundidad de los niveles freáticos (Ver Fig. 5). Para el caso del pozo 8 se presenta una disminución en la profundidad del nivel freático para el mes de abril en comparación con el mes de marzo.

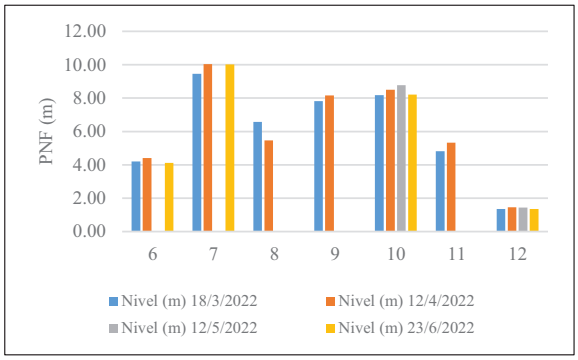


Fig. 5. Profundidad a nivel freático de las mediciones puntuales de los pozos en la parte baja de la SRZ. Los números 6 al 12 corresponden a la nomenclatura utilizada para la identificación de los pozos de monitoreo en la Figura 2.

IV. Discusión

A. *Precipitación*

Adicional a los registros de precipitación para los primeros meses de estudio, el registro histórico de vientos de ETESA [6] muestra que marzo y abril son los meses en donde se registran las mayores velocidades de viento, alcanzando un máximo histórico de 9.2 m/s, condición que afecta directamente la evapotranspiración, lo cual, en adición a la baja precipitación para este periodo, hace la situación de escasez de agua más crítica en la SRZ. Aunado a esto, para finales de abril, ocurrieron eventos de precipitación en donde hubo mayor lluvia en la parte baja de la cuenca que en la parte alta, donde Paso Ancho y Sonadora recibieron picos de precipitación de 74 y 79 mm respectivamente, mientras que Sofre y Altos de la Estancia registraron 34 y 71 mm de lluvia. Esto posiblemente debido a formaciones convectivas de precipitación, que producto de los fuertes vientos, se ven desplazadas rápidamente sobre la cuenca, acarreando consigo las masas húmedas de aire que finalmente se depositan en la parte baja de la cuenca.

De igual forma, cabe mencionar que la altitud juega un papel importante en la precipitación, lo cual explica las variaciones de precipitación de una estación a otra, sobre todo durante mayo y junio, una vez ya asentada la temporada lluviosa. Un ejemplo de esto son las mediciones para Alto de la Estancia (588 msnm) y Sofre (326 msnm) que, a pesar de tener elevaciones distintas, y estar a separadas por una distancia de 5.6 km, se observan variaciones en la precipitación. Para junio, se observa una mayor precipitación en la parte alta de la cuenca, y esto puede ser explicado por el efecto orográfico propio de la región, en donde grandes masas calientes con alto contenido de humedad, depositan sus aguas en este corredor montañoso que conforma la parte alta de la SRZ [7].

B. *Relaciones de la precipitación con variaciones en los niveles freáticos*

Los pozos en la parte alta presentan dos patrones de comportamiento de los niveles freáticos. Para los pozos 1, 2 y 4 se aprecia que en el mes de abril hay un aumento en la profundidad del nivel freático, y luego empieza a disminuir para los siguientes meses. Esto guarda una relación directa con los registros de precipitación de las estaciones de Sofre y Altos de la Estancia, en donde se manifiesta que durante el mes de marzo hay poca precipitación, y aumenta a medida que pasan los meses. Sin embargo, los pozos 1, 2 y 4 al presentar ese

aumento de la medición en el mes de abril, posiblemente represente que los usos de suelos y/o capas geológicas influyan en retardar el impacto directo de los eventos de precipitación en los niveles freáticos en la zona. Igualmente, en la zona donde se ubica el pozo 4 (Churuquita Chiquita), existe una red de pozos activos (no mostrados) que pueden influenciar en las variaciones de los niveles freáticos, y a pesar de que el acuífero está recibiendo aportes de la precipitación (mínima precipitación), se ve influenciada por la extracción de agua para uso doméstico en la zona. Por otro lado, para los meses de estudio, en los pozos 3 y 5, se puede apreciar que ocurre linealmente una disminución de la profundidad de los niveles freáticos producto posiblemente del impacto de la precipitación en la zona. Esto guarda relación con un estudio llevado a cabo en Boyacá, Colombia, que señala que la fluctuación del nivel freático se ve afectada directamente por la cantidad, distribución y frecuencia de la precipitación en un punto, pero adicionalmente existen otras variables como la cobertura y tipo de suelo [8], que pueden influir. También, se ha comprobado estadísticamente que el nivel freático tiene una relación con la temperatura máxima, mínima y ambiental, precipitación, y evaporación. Entre estos, se obtuvo que las variables que afectan directamente el comportamiento del nivel freático son la temperatura, precipitación y evaporación. En este estudio se observó un ascenso del nivel freático durante los meses de lluvia y luego un descenso en la época seca [9].

Para los pozos de la parte baja de la SRZ se aprecia que para los meses de marzo y abril todavía no hay un impacto significativo en la precipitación, lo que pueda producir un aumento en los niveles freáticos de la zona, con excepción del pozo 8, el cual se encuentra cerca de una quebrada que pudiera estar posiblemente alimentando a ese pozo. Por otro lado, cabe mencionar que en la parte baja, por parte del IDAAN hay una gran cantidad de pozos activos que de igual forma ralentizan el impacto de la precipitación en las variaciones de los niveles freáticos. Sin embargo, para las mediciones de mayo y junio, se puede apreciar que a medida que aumentan las lluvias, hay un ligero impacto en los niveles freáticos de los pozos de la parte baja de la SRZ. Un estudio sobre la recarga de acuíferos en llanuras mostró un bajo coeficiente de correlación entre la precipitación y el nivel freático incluso durante meses con eventos de alta precipitación, pero a pesar de los bajos niveles de correlación, se observaron mayores cambios en el nivel del acuífero en los meses de precipitaciones intensas, encontrándose una estacionalidad en los niveles de ascensos del nivel freático relacionado con la recarga [10].

Otro aspecto que se ha tomado en cuenta al estudiar la relación entre las aguas subterráneas y la precipitación es la profundidad del agua subterránea. Como en [11], establece que existen aguas subterráneas poco profundas, intermedias y profundas. En el caso de las poco profundas se encontró la posibilidad de establecer una correlación entre la precipitación y la recarga, dado que cuando el nivel freático es poco profundo la infiltración alcanza las aguas subterráneas relativamente rápido. Considerando que, se ha encontrado que el nivel freático en la SRZ es somero (cercano a 10 m) [12], se puede esperar una correlación entre la precipitación y el nivel freático.

V. Conclusión

Se encontró una relación entre la precipitación y los niveles freáticos tanto para la parte baja, como para la parte media y alta de la SRZ. Cabe mencionar que existen diferencias en estas relaciones producto de varios factores no evaluados en este artículo como lo son el tipo y uso de suelo, y el aprovechamiento del recurso subterráneo a través de pozos activos que dificultan cuantificar la relación directa entre la precipitación y las variaciones de los niveles freáticos. Sin embargo, se aprecia un claro impacto de la precipitación sobre las variaciones de los niveles freáticos en los pozos someros. Este estudio preliminar sirve como línea base para mejor comprender los procesos físicos que ocurren en una cuenca hidrográfica, y que, a su vez, sirvan para informar y tomar decisiones en cuanto al uso y extracción del recurso hídrico.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT) por financiar el proyecto (FID 17-084) dentro del cual se realiza esta investigación. Igualmente, También agradecemos al Sistema Nacional de Investigación de Panamá por apoyar al investigador principal de este proyecto y coautor de este artículo. Agradecemos al Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados de Panamá (IDAAN) por el apoyo brindado y a las personas de la comunidad SRZ por todo el apoyo y cariño brindado durante esta investigación.

Referencias

[1] Consejo Nacional del Agua, “Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos,” Panamá, República de Panamá, ISBN: 978-9962-5581-0-1, 2016.

[2] Autoridad Nacional del Ambiente, “Las aguas subterráneas de la región del Arco Seco y la importancia de su conservación,” ISBN 978-9962-651-80-2, 2013.

[3] Ministerio de Ambiente. “Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2050,” ISBN: 978-9962-8511-2- 7, 2019.

[4] W. González Carrasco, Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2011. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2932.

[5] J. Noel Amaya, K. Espino, M. Muñoz, J. Fábrega, Relation of the precipitation with variations in the water table in a subbasin of the Central Pacific region of Panama. Proceedings of the 39th IAHR World Congress—From Snow To Sea. 19–24 June 2022, Granada, Spain. doi:10.3850/IAHR-39WC252171192022311.

[6] Empresa de Transmisión Eléctrica, S. A. (ETESA). Consultado 27 julio de 2022, https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos.

[7] S. Varadarajan, J. Fábrega, B. Leung. Predicting spatiotemporal variation in runoff in a data-sparse region: analyses of a whole-country model for Panama. https://doi.org/10.1002/essoar.10507966.2 (paper submitted under consideration - unpublished).

[8] L. Gutiérrez Molano, “Variabilidad del nivel freático en función de la precipitación infiltrada a un periodo de retorno de 20 años según el sgc, en el sector areneras, municipio de sogamoso,” 2020. https://hdl.handle.net/10983/24571.

[9] S. Carreño, “Efecto de las variables climáticas sobre la fluctuación del nivel freático en suelos fluvisoles del valle del río carrizal,” Ciencia y Tecnología, vol. 13, no. 2, Dec. 2020, doi: 10.18779/cyt.v13i2.393.

[10] O. Quiróz-Londoño, D. Martínez, H. Massone, “Estimación de recarga de acuíferos en ambientes de llanura con base en variaciones de nivel freático,” Water Technology and Sciences , vol. III, no. 2, pp. 123–130, 2012.

[11] J. Wu, R. Zhang, J. Yang, “Analysis of rainfall-recharge relationships,” Journal of Hydrology,Volume 177, Issues 1–2, 15 March 1996, Pages 143-160. https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02935-4.

[12] M. Castrellón, M. Muñoz, G. Guerra-Chanis, J. Leiva, L. Foglia, J. Fábrega, “Las aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá: Un tesoro por explorar,” Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC, pp. 113–119, Jun. 2021, doi: 10.33412/apanac.2021.3180

Phase Change Materials in Hot Water Generation Systems: A Review

Diana Berrocal
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
diana.berrocal@utp.ac.pa

Juan Blandon
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
juan.blandon@utp.ac.pa

Maria De Los Ángeles Ortega Del Rosario
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
maria.ortega@utp.ac.pa

Itamar Harris
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
itamar.harris@utp.ac.pa

Arthur James
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
arthur.james@utp.ac.pa

***Abstract* — Solar hot water generation systems are still a valuable technology for reducing carbon dioxide emissions to the environment. These systems can be used for extended periods when integrated with phase change materials (PCMs). Because of this advantage, the main objective of this article is to review the last five years of studies, including experiments, improvements, and the materials used as PCMs for domestic hot water (DHW) generation. A search strategy consisting of keywords and search equations was proposed, allowing this study to find 51 relevant articles. From them, it was found that the most commonly used PCMs are paraffins. In addition, experimental validations mainly focused on the working fluid and PCM and the charge and discharge conditions. Likewise, improving the thermal conductivity of PCMs can help positively by increasing the performance of TES (thermal energy storage) systems for hot water generation.**

Keywords — domestic hot water, experimental studies, PCM, solar thermal systems, TES

I. INTRODUCTION

Hot water generation involves high carbon dioxide emissions since they commonly rely on conventional energy sources [1]. On the other hand, renewable sources such as solar radiation are used to generate more sustainable energy by reducing these emissions into the atmosphere. However, these systems are not fully efficient, and hot water is only available during certain hours of the day [2].

For this reason, thermal energy storage (TES) systems have become attractive since they can be used as auxiliary systems when these renewable sources can no longer achieve the expected production [3], [4]. Fig. 1 depicts the classification of the materials for TES; among them is the use of PCM as sensible heat storage (LHS). Based on the literature, PCMs are commonly used for hot water generation. This is due to their high density, small phase change temperature range, low storage volume, and lower cost [5]–[7]. However, a disadvantage of PCMs is their low thermal conductivity which can affect their energy storage rate. For this reason, many researchers are looking for ways to increase this factor using different methods [5], [8].

PCM use for domestic hot water (DHW) solar systems has increased in recent years for commercial, domestic and industrial use [4], [9]. This increase is because they allow an improvement in the performance and efficiency of these systems. In addition, the literature indicates that the countries with the highest incidence of studies on PCMs are those with temperate, dry, and tropical climates also that the addition of PCM to DHW systems is used in two ways, integrated into the solar collector [3], and not integrated to the solar collector (storage tank) [10].

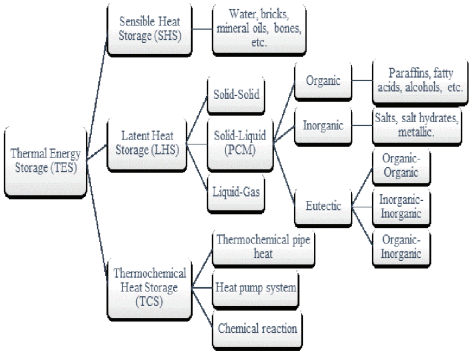


Fig. 1. Classification of thermal energy storage (TES) materials [3], [7], [11].

Solar systems with integrated PCMs work by heating the water with the collected solar energy, and, at the same time, the PCM absorbs and stores thermal energy within itself. The thermal energy of the PCM will be recovered at night when there is no sunlight to heat the water [12].

Knowing the importance of PCMs through the research carried out, a comprehensive review of the last five years has been done to analyze the studies involving experimental models and further improvements that can be added to the TES to increase heat transfer.

II. METHODOLOGY

The information was collected by following a search strategy in the last five years, i.e., from 2018 to 2022. The steps to archive these results were as follows:

A. Identification of specific keywords:

In this step, keywords were used to search for information. The terms used in this research were: domestic hot water, TES, PCM, solar thermal systems, experimental, modeling, systems, and model. All these words were combined to generate four searches. These were:

- Domestic hot water AND TES AND PCM AND experimental AND modeling AND systems
- Domestic hot water AND TES AND PCM
- TES AND PCM AND solar thermal systems
- Domestic hot water AND TES AND PCM AND solar thermal systems AND experimental AND model

B. Logical operators:

For this review, only the Boolean operator AND was used to develop a more compact search for information.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00103

C. Bibliographic database:

The bibliographic databases used for this review were Science Direct, SpringerLink, MDPI, DOAJ, and Google Scholar.

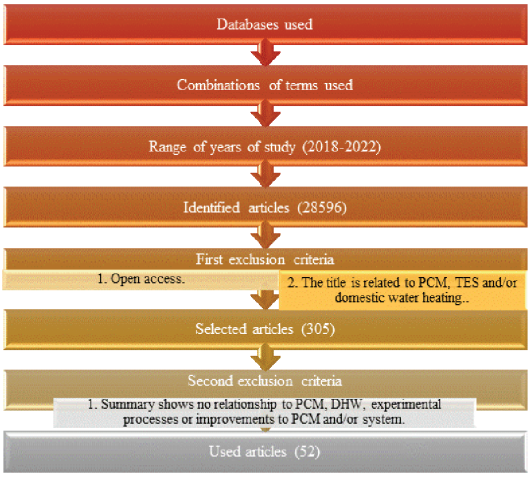


Fig. 2. Search strategy proposed.

D. Search strategy:

Fig. 2 shows the search strategy used for all databases and keywords. It should be noted that only open acces scientific articles were studied. In addition, some articles were duplicated within databases.

III. RESULTS

A bibliometric analysis of these documents' metadata was performed in VOSviewer. This allowed knowing which was the most significant year of publications according to the range and the relationship between the keywords found in these articles. Fig. 3 shows the occurrence of keywords found in scientific articles. For this, a minimum of 30 occurrences

Fig. 3. Bibliometric analysis of the relationship of keywords found.

was used. Therefore, the keywords with the highest occurrence were: Thermal Energy Storage, Phase Change Material, Phase Change Materials, solar energy, and PCM.

In Fig. 4 is shown, according to the keywords, the most significant number of documents in the years studied. These results indicate that the most significant number of documents are between 2020 and mid-2021.

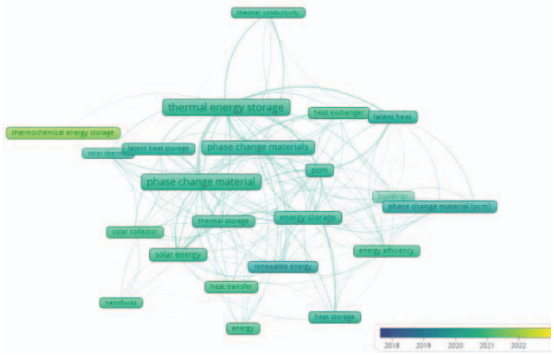


Fig. 4. Bibliometric analysis by the years of the keywords.

The materials used as PCMs, experiments, and improvements to thermal energy storage systems found in this review are described below.

A. PCM used in hot water generation systems.

The materials commonly used as PCM in thermal energy storage applications are organic and inorganic. This is due to their melting point range of 15-130 °C [13]. Since hot water generation systems require low or medium temperatures, organic PCMs have better functionality [14] due to their melting temperatures between -5 and 71°C [10].

Table I describes some PCM commonly used for solar system applications with thermal energy storage, according to the search performed. In this table, one can see that paraffins are the most extended type of PCM. This is because paraffins are non-toxic, safe, accessible, compatible with metal coatings, and have demonstrated long-term stability [7], [15]. According to Dash et al. [16], molten salt is the best PCM for storing solar thermal energy. Since it is not an expensive PCM and has a high working temperature, it is suitable for solar water heaters and photovoltaic solar systems. While Suryawanshi et al. [17] indicate that paraffin, sodium acetate trihydrate, and fatty acids are strong candidates for thermal energy storage and use in DHW applications.

Moreover, Wang et al. [18] indicate that the melting temperature range of 50 to 60 °C is the most suitable for PCMs according to their energy efficiency and domestic hot water use. In addition, the most popular PCM is based on sodium acetate trihydrate and has the benefits of high latent heat and economic cost, but its application is limited by its high supercooling, low thermal conductivity, and phase separation.

B. Modeling of thermal energy storage systems

Table II shows some experimental studies conducted to generate hot water. As can be seen, most studies cover criteria such as the charge and discharge temperatures of the working fluid temperature. Likewise, it shows how these systems are affected by the flow or flow rate variation.

Table I. PCM used in different investigations.

PCM type	Melting point (°C)		Latent heat (kJ/kg)	Density (kg/m^3)		Thermal conductivity (W/ (m K))
	L[a]	S[b]		L	S	
Paraffin A16 [14]	15-17	17-15	213	800	830	0.18
Paraffin RT35 [19]	35		160	760	880	0.20
Paraffin RT25 [20]	25	18	170	760	880	0.20
Paraffin RT27 [19]	27		179	760	870	0.2
Paraffin RT44 [21]	43		250	700	800	0.2
ATP 43 [21]	43		265	760	780	0.2
Paraffin-based A53 [22]	52.45	51.05	237	772	839	0.22
Paraffin-based A58H [22]	57.25	55.85	284	790	816	0.22
Paraffin-based P53 [22]	58	55	240	776	901	0.37
Paraffin RT82 [23]	85	77	176	770	950	0.2
Lauric acid [21]	43.9		182.92	870	1.007	0.15-0.37
Paraffin RT42 [19]	41		165	760	880	0.2
Paraffin wax [24]	48.3-62		114.54	820		0.14
n-octadecane [25]	28		236.98	770	867	0.148-0.334
n-eicosane [26]	36.4		247.3	778	856	0.15-0.35
SavEHS34 [27]	31.65		---	1750		0.47
Paraffin A40 [28]	39		---	775	830	0.24
Paraffin A44 [28]	44		---	775	830	0.24
Refined paraffin wax blend A46 [28]	45		---	775	830	0.24
CrodaTherm53 [29]	53		---	829	---	0.16-0.28
Bee wax [30]	60.45	57.85	141.49	961		0.3
Paraffin RT58 [31]	61.85	47.85	180	840		0.2
Paraffin RT62HC [32]	62-63		230	840	850	0.2
Stearic acid [33]	57		198.91	840	960	0.172-0.3

[a] L: Líquido
[b] S: Sólido

The results show that using PCM in TES systems significantly improves performance. This allows to supply hot water during the night or when there is no sun. Nagilla et al. [34] concluded in the same way in their review that these systems could allow vast possibilities for innovation at the domestic and industrial level; and that these systems have a high potential to supplant conventional hot water generation systems.

In addition, it can be seen in Table II that most of the studies evaluate the TES system's thermodynamic behavior, whether using latent heat by PCM or sensitive heat by fluids such as water, for example. Few studies evaluate the savings when using these types of systems. An example of these studies was conducted by Al-Abdali et al. [35], indicating that an annual saving of 211.00 USD and a fuel cost of 45.00 USD can be obtained.

C. TES system improvements

According to the literature, the most common way to improve the performance of TES systems is by increasing the PCM's thermal conductivity. That is why the most common methods are: the addition of nanoparticles, nanomaterials, microencapsulation, porous media, composite PCMs, porous support, heat pipes, and the use of multiple PCMs [36]–[40]. Some of the most relevant studies conducted for the most used improvements are:

1) Addition of nanoparticles

Abdulateef et al. [41] discovered a way to increase heat transfer in TES systems for many applications. Their methodology consisted of numerical and experimental models of a triple tube heat exchanger (TTHX), using the PCM RT82, alumina nanoparticles, and fins. The experimental results indicated that the combination of nanoparticles and fins to the PCM describes significant effects on the fusion of the PCM in a triple tube exchanger and can be used in different heat transfer applications.

Kumar et al. [42] developed a study of paraffin wax with a 1.0% mass of SiO_2 nanoparticles to improve heat storage capacity, consisting of real-time experimental measurements with a glass vacuum tube solar water heater integrated with TES. The results indicated that when adding SiO_2 nanoparticles to the PCM, the water tank's temperature increased by 2.6°C compared to when only PCM was used. Energy efficiencies increased by 5.17% and exergetic efficiencies by 2.6%, compared to PCM without the nanoparticles. Due to these changes made in the system, the thermal conductivity increased by 22.78%. On the other hand, Elarem et al. [8] indicate that the PCM (paraffin wax) improves its melting temperature by adding copper and aluminum nanoparticles.

2) Microencapsulation

Sami et al. [43] observed how thermal stability and thermal conductivity coefficient behaved in lauric acid (LA), microencapsulated LA, and microencapsulated LA with MgO, TiO_2, and graphite nanoparticles with mass ratios of 3, 5, 7, and 10%. In their results, this author indicated that the thermal conductivity of the microencapsulated LA increased 0.003 W/m K. While the LA microencapsulated with MgO nanoparticles presents the highest thermal conductivity for

this study. This proves that microcapsules can improve the PCM's thermal conductivity and the melting and solidification process.

Table II. Results of experimental studies found in the literature.

Reference	Energy source	Nature of the work	PCM	Test method	Test variables	Results
Youssef et al. [14]	Heat pump assisted by solar energy of indirect expansion.	Numerical - Experimental	Paraffin A16	Charging and discharging	Flow rate, charge and discharge times, and temperature of the inlet heat transfer fluid (HTF).	❖ Test variables can affect the loading and unloading processes of the heat exchanger PCM. ❖ The higher the inlet flow of the HTF, the accelerated discharge loading processes. ❖ When HTF inlet temperatures are low or high, they affect the loading and unloading processes.
Dogkas et al. [44]	Heat pump	Experimental	Paraffins A53-A58H	Discharging	Flow, charge and discharge temperature, energy discharge.	❖ PCM A58H provides more heat during solidification than PCM A53, increasing efficiency. ❖ The tank must have an outlet temperature of above 40°C to be fully charged. ❖ Hot water production is between 106 to 164 liters when the temperature is above 40°C.
Li et al. [45]	---	Experimental	PCM-50	Charging and discharging	Flow and temperature of inlet and outlet (water and PCM).	❖ The water supply temperature is lower when the temperature of the PCM decreases to the phase change temperature. Thus, being the discharge process less than in a traditional water tank ❖ Otherwise, when the temperature of the PCM exceeds the phase change temperature, the water supply temperature exceeds the temperature of a traditional water tank. ❖ The system will only operate efficiently at supply temperatures above 30°C.
Koukou et al. [28]	Electric heater	Numerical - Experimental	Paraffins A40, A44, A46 and A53	Charging and discharging	Flow rate, charge, and discharge temperature	❖ The higher the flow rate, the faster the melting and solidification processes.
Mohamed et al. [46]	---	Experimental	Paraffin RT44HC	Charging and discharging	Inlet temperature of HTF and flows.	❖ The natural convection of the PCM affects heat transfer during charging. ❖ When discharge, thermal conduction is dominant. ❖ The increase in inlet temperature decreases the charging time.
Mao et al. [15]	Custom Electric Flange Heater	Numerical - Experimental	Paraffins RT48 and RT60	Discharging	Temperature and speed of entry.	❖ The most appropriate input rate for HTF is 0.8 m/s for this research. ❖ The increase in total heat release is 13.8 percent when the HTF inlet temperature drops from 28°C to 4°C.
Bie et al. [47]	Solar collector	Numerical-Experimental	Molten salt of binary nitric acid (PCM1 and PCM2)	Charging	Inlet and outlet temperature	❖ During variations of solar radiation, the temperature in the latent heat storage tank is more stable. ❖ The heat transfer power and stored heat are lower in the PCM1 than in the sensitive heat storage fluid (oil).
Al-Abdali et al. [35]	Vacuum tube solar collector	Experimental	Paraffin wax	Charging	Inlet temperature, flow rate, PCM temperature	❖ Paraffin wax can improve TES by 8.6% and an efficiency of 7%. ❖ There is an annual saving of USD 211/year and a receiver fuel cost of USD 45; these values are lower than conventional hot water generation systems.
Fadl et al. [32]	Vacuum Tube Solar Collector Kingspan Thermomax HP	Experimental	Paraffin RT62HC	Charging and discharging	Inlet temperature, flow rate	❖ It was observed that the melting and solidification time decreased with the increase in the flow rate of the HTF, at a constant temperature. ❖ Changing the inlet temperature to the HFT and having the flow rate constant decreased the loading time compared to the flow variation.
Isamotu et al. [48]	Flat plate solar collector	Numerical – Experimental	Eutectic salt mixture	Charging and discharging	Temperature of the inlet water, mass flow of the water, temperature of the outlet water and the molten fraction.	❖ The charging temperature decreases at the beginning of the solar collector's operation by adding the eutectic salt mixture. Whereas the discharge temperature increases. ❖ Salt hydrates conserve more stored energy than paraffins. ❖ The heat absorbed during loading increases with high water mass flows and decreases during the discharge process.

Qin et al. [49]	Hot spring water tank	Experimental	46# paraffin	Charging	Charging temperature, PCM temperature, PCM stratification	❖ Improvement of the thermal performance of the hot water tank. ❖ With the use of PCM, it increases the water temperature to 8.5% at the top of the tank. ❖ Changing the quantity and location of the PCM yields different results in the loading process, and this is because it will store more energy.

3) Porous media

Ebadi et al. [25] conducted an experimental study to improve a PCM's thermal conductivity by incorporating a porous media (PM). The methodology involved subjecting the PM with the PCM to three different isothermal surface temperatures, and the PM presented two different densities of porosity. The results indicated a uniform distribution within the TES system when placing the PM. In addition, the system's loading time increases by 17% and 24%, with a porous medium porosity of 87% and 75%, respectively, as well as the heat transfer and stored energy increased due to the higher thermal conductivity generated by adding a PM.

Wang et al. [1] indicated that the optimization methods of the TES system could improve performance. This study analyzed as parameters: the influence of flow direction, the size of the inlet, and the addition of a porous plate. Their results show that these changes in the TES system can generate significant changes, such as reducing the PCM fusion time and TES system load time.

On the other hand, Guo et al. [50] indicated that the degree of inclination in PCMs with porous media greatly influences the fusion process. In the case of a 30° tilt, the melting time was reduced to 25.30%, compared to a 60° angle. This shows that this small change can increase or improve heat storage efficiency.

4) Composite PCMs

Wang et al. [18] used sodium acetate trihydrate, disodium hydrogen phosphate dodecahydrate, and expanded graphite to create a CPCM. The methodology consisted of studying the properties by the step cooling curve, differential scanning calorimetry, and X-ray diffraction; and assessing the effect of physical disturbance on the crystallization of CPCM. The results showed that thermal conductivity increased almost twice as much, but subcooling decreased by 0.5°C. This indicates that CPCM is a basis for improving heat transfer in hot water generation systems. On the other hand, Chavan et al. [51] indicate that CPCM can be created with the help of recycled plastics. According to their experimental results, this addition can improve thermal storage capacity by 54%, which indicates that this new material can be efficient for TES systems.

5) Adding Multiple PCMs

Siyabi et al. [19] studied numerically and experimentally how different PCM arrangements can improve fusion time. To do this, they used a workflow ratio and a constant inlet temperature for three different arrays. To evaluate the effect of geometry on these PCMs in the loading and unloading processes. Their results indicated that increasing the contact area between heat transfer fluid and PCM can reduce the thermal resistances of conduction and convection. In addition, by increasing geometric conditions such as the internal radius where the HTF passes, the average temperature of the PCM increases. Moreover, with this, the thermal storage of the system is increased.

6) Addition of fins

Hassan et al. [24] indicated that adding fins to a shell and tube type latent heat storage unit (LHSU) can improve the system's heat transfer with PCM. It should be noted that the fins were added outside the tubes of the LHSU unit where the PCM is located. In addition, this study performed a thermal analysis comparing three fin geometries (circular, longitudinal, and without fins), and their experimental results indicated that the loading time was reduced to 70% with circular fins and 55% with longitudinal fins. On the other hand, Li et al. [52] made a numerical model and experimentally validated it. This model consisted of adding finned PCMs to a U-type vacuum tube collector, which evaluated thermal performance. Their results showed that by increasing the collector tubes, the thermal efficiency is 50.72%, and the thermal storage efficiency is 19.20%. Also, the discharge time when the temperature is higher than 34.85°C extends to 160 minutes, compared to the case without PCM. This indicates that the addition of fins can increase the collector's performance.

IV. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

This study reviews the application of PCM in TES systems for hot water generation. PCMs can be placed in solar collectors or storage tanks, increasing the use and benefits due to their ability to store thermal energy for a longer time. The conclusions and recommendations for the review are described below.

1. Organic PCMs are more widely used in hot water generation systems. They are mostly paraffins, due to their low melting temperature.

2. The studies related to experimental validations show that PCMs contribute to the increased performance of hot water generation systems, allowing hot water to be used at night and for hours when solar irradiation is not constant.

3. TES systems for hot water generation can be improved with different additives, such as nanoparticles, porous media, fins, microencapsulation, multiple PCMs, and composite PCMs. It can be further improved if combining them.

4. The use of plastics or scrap will allow the system to contribute even more to reducing the carbon footprint in our environment. Therefore, it is recommended to use polyethylene and iron to make the system more ecological with the environment and increase the PCM's thermal conductivity.

5. Further studies should be conducted on the economic analysis of these systems as well as environmental impact analysis that allows knowing the life cycle of the PCM and how it would affect the environment after not working correctly in the system.

ACKNOWLEDGMENT

We thank the National Bureau of Research, Science and Innovation (SENACYT- acronym in Spanish https://www.senacyt.gob.pa/) for supporting the Master of Science in Mechanical Engineering program of the Department of Mechanical Engineering (https://fim.utp.ac.pa/) of the Universidad Tecnológica de Panamá (https://utp.ac.pa/).

REFERENCES

[1] G. Wang *et al.*, "Design optimization of a latent heat storage using sodium acetate trihydrate," *J. Energy Storage*, vol. 52, no. PA, p. 104798, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104798.

[2] H. M. Teamah, "Comprehensive review of the application of phase change materials in residential heating applications," *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 4, pp. 3829–3843, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.02.053.

[3] A. M. Nair, C. Wilson, M. J. Huang, P. Griffiths, and N. Hewitt, "Phase change materials in building integrated space heating and domestic hot water applications : A review," *J. Energy Storage*, vol. 54, no. June, p. 105227, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105227.

[4] E. Douvi *et al.*, "Phase change materials in solar domestic hot water systems: A review," *Int. J. Thermofluids*, vol. 10, p. 100075, 2021, doi: 10.1016/j.ijft.2021.100075.

[5] H. Behi *et al.*, "Enhancement of the thermal energy storage using heat-pipe-assisted phase change material," *Energies*, vol. 14, no. 19, 2021, doi: 10.3390/en14196176.

[6] Y. Krishna, N. Aslfattahi, R. Saidur, M. Faizal, and K. C. Ng, "Fatty acid/metal ion composite as thermal energy storage materials," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 5, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2597-3.

[7] S. Ali and S. P. Deshmukh, "An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, no. May, pp. 1231–1237, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.247.

[8] R. Elarem, T. Alqahtani, S. Mellouli, G. A. El Awadi, S. Algarni, and L. Kolsi, "Experimental investigations on thermophysical properties of nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage applications," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 9, pp. 7037–7044, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.12.046.

[9] M. Mofijur *et al.*, "Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview," *Energies*, vol. 12, no. 16, pp. 1–20, 2019, doi: 10.3390/en12163167.

[10] M. C. Ndukwu, L. Bennamoun, and M. Simo-Tagne, "Reviewing the exergy analysis of solar thermal systems integrated with phase change materials," *Energies*, vol. 14, no. 3, 2021, doi: 10.3390/en14030724.

[11] I. Harris, M. D. L. A. O. Del Rosario, A. James, and D. Bruneau, "Introduction to the application of phase change materials under tropical climate of Panama," *Proc. - 2019 7th Int. Eng. Sci. Technol. Conf. IESTEC 2019*, no. October, pp. 177–182, 2019, doi: 10.1109/IESTEC46403.2019.00-80.

[12] N. Kumar and S. K. Gupta, "Progress and application of phase change material in solar thermal energy: An overview," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, no. November, pp. 271–281, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.465.

[13] S. Nagar and P. K. Singh, "A short review on the Industrial applications of phase change materials," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1116, no. 1, p. 012006, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1116/1/012006.

[14] W. Youssef, Y. T. Ge, and S. A. Tassou, "CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 157, no. October 2017, pp. 498–510, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.036.

[15] Q. Mao, Y. Li, and M. Chen, "Design and investigation of single tank phase change thermal storage domestic hot water system," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 25, p. 100903, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100903.

[16] L. Dash and P. Anna Mahanwar, "a Review on Organic Phase Change Materials and Their Applications," *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 9, pp. 268–284, 2021, doi: 10.33564/ijeast.2021.v05i09.045.

[17] P. K. P. Suryawanshi, A. Burkule, S. R. Upasani, and P. Singh, "A Review on Utilization of Phase Change Material in Solar Water Heating System," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, pp. 1075–1077, 2020, [Online]. Available: www.irjet.net.

[18] S. Wang, C. Wang, M. B. Hussain, X. Cheng, and Z. Wang, "Study on Performance Improvement of Sodium Acetate Trihydrate in Thermal Energy Storage System by Disturbance," *Processes*, vol. 10, no. 6, p. 1093, 2022, doi: 10.3390/pr10061093.

[19] I. Al Siyabi, S. Khanna, T. Mallick, and S. Sundaram, "Experimental and numerical study on the effect of multiple phase change materials thermal energy storage system," *J. Energy Storage*, vol. 36, pp. 1–28, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102226.

[20] F. Torbarina, K. Lenic, and A. Trp, "Computational Model of Shell and Finned Tube Latent Thermal Energy Storage Developed as a New TRNSYS Type," *Energies*, vol. 15, no. 7, 2022, doi: 10.3390/en15072434.

[21] I. A. Harris Bernal, A. M. James Rivas, M. D. L. A. Ortega Del Rosario, and M. Z. Saghir, "A Redesign Methodology to Improve the Performance of a Thermal Energy Storage with Phase Change Materials: A Numerical Approach," *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022, doi: 10.3390/en15030960.

[22] M. K. Koukou *et al.*, "Computational Approach of Charging and Discharging Phases in a Novel Compact Solar Collector with Integrated Thermal Energy Storage Tank: Study of Different Phase Change Materials," *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022, doi: 10.3390/en15031113.

[23] Y. Han, Y. Yang, T. Mallick, and C. Wen, "Nanoparticles to Enhance Melting Performance of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 11, p. 1864, 2022, doi: 10.3390/nano12111864.

[24] A. K. Hassan, J. Abdulateef, M. S. Mahdi, and A. F. Hasan, "Experimental evaluation of thermal performance of two different finned latent heat storage systems," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 21, p. 100675, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100675.

[25] S. Ebadi, S. H. Tasnim, A. A. Aliabadi, and S. Mahmud, "An experimental investigation of the charging process of thermal energy storage system filled with PCM and metal wire mesh," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, no. March, p. 115266, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115266.

[26] A. Bayomy, S. Davies, and Z. Saghir, "Domestic hot water storage tank utilizing phase change materials (PCMs): Numerical approach," *Energies*, vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.3390/en12112170.

[27] M. Miansari, M. Nazari, D. Toghraie, and O. A. Akbari, "Investigating the thermal energy storage inside a double-wall tank utilizing phase-change materials (PCMs)," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 139, no. 3, pp. 2283–2294, 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08573-2.

[28] M. K. Koukou, M. G. Vrachopoulos, N. S. Tachos, G. Dogkas, K. Lymperis, and V. Stathopoulos, "Experimental and computational investigation of a latent heat energy storage system with a staggered heat exchanger for various phase change materials," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 7, no. May, pp. 87–98, 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.05.004.

[29] M. Kuta, D. Matuszewska, and T. M. Wójcik, "Designs of PCM based heat exchangers constructions for thermal energy storage tanks - Examples and case study for selected design," *E3S Web Conf.*, vol. 70, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20187001010.

[30] D. K. Mishra, S. Bhowmik, and K. M. Pandey, "Development and Assessment of Beeswax/Expanded Graphite Composite Phase Change Material for Thermal Energy Storage," *Arab. J. Sci. Eng.*,

2022, doi: 10.1007/s13369-021-06476-9.

[31] B. Buonomo, A. Di Pasqua, D. Ercole, and O. Manca, "Numerical study of latent heat thermal energy storage enhancement by nano-pcm in aluminum foam," *Inventions*, vol. 3, no. 4, 2018, doi: 10.3390/inventions3040076.

[32] M. Fadl and P. Eames, "Thermal Performance Analysis of the Charging/Discharging Process of a Shell and Horizontally Oriented Multi-Tube Latent Heat Storage System," *Energies*, vol. 13, no. 23, 2020, doi: 10.3390/en13236193.

[33] H. Tarigond, R. M. Reddy, C. U. Maheswari, and E. S. Reddy, "Effect of iron scrap additives in stearic acid as PCM for thermal energy storage system," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 141, no. 6, pp. 2497–2510, 2020, doi: 10.1007/s10973-020-10117-y.

[34] D. K. Nagilla, V. V. Tyagi, K. Kadirgama, K. Chopra, A. K. Pandey, and R. Kothari, "Application of Phase Change Materials in Solar Water Heating Systems for Thermal Energy Storage," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1127, no. 1, p. 012012, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1127/1/012012.

[35] A. M. Al-Abdali and H. Ammari, "Thermal energy storage using phase-change material in evacuated-tubes solar collector," *AIMS Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 486–505, 2022, doi: 10.3934/energy.2022024.

[36] S. S. Mundra and S. S. Pardeshi, "Latent heat energy storage system using phase change materials and techniques for their performance improvement: A Review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1126, no. 1, p. 12068, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1126/1/012068.

[37] K. Tofani and S. Tiari, "Nano-enhanced phase change materials in latent heat thermal energy storage systems: A review," *Energies*, vol. 14, no. 13, 2021, doi: 10.3390/en14133821.

[38] G. Wheatley and R. I. Rubel, "Design improvement of a laboratory prototype for efficiency evaluation of solar thermal water heating system using phase change material (PCMs)," *Results Eng.*, vol. 12, p. 100301, 2021, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100301.

[39] S. Zhang *et al.*, "A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, pp. 1–88, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110127.

[40] C. Chang, G. Chen, F. Wu, Z. Han, and L. Pei, "Fabrication and Thermal Performance of 3D Copper-Mesh-Sintered Foam/Paraffin Phase Change Materials for Solar Thermal Energy Storage," *Processes*, vol. 10, no. 5, 2022, doi: 10.3390/pr10050897.

[41] A. M. Abdulateef *et al.*, "Enhancing the melting of phase change material using a fins- nanoparticle combination in a triplex tube heat exchanger," *Energy Storage*, vol. 35, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102227.

[42] P. Manoj Kumar and K. Mylsamy, "Experimental investigation of solar water heater integrated with a nanocomposite phase change material," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 136, no. 1, pp. 121–132, 2019, doi: 10.1007/s10973-018-7937-9.

[43] S. Sami and N. Etesami, "Heat transfer enhancement of microencapsulated phase change material by addition of nanoparticles for a latent heat thermal energy storage system," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 4930–4940, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.07.080.

[44] G. Dogkas *et al.*, "Development and experimental testing of a compact thermal energy storage tank using paraffin targeting domestic hot water production needs," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 19, no. May, p. 100573, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100573.

[45] J. Li, E. Long, F. Liang, H. Zou, and N. Mao, "Experimental study on dynamic heat release performance of water tank with phase change materials," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 5006–5013, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.664.

[46] M. Fadl and P. C. Eames, "An experimental investigation of the heat transfer and energy storage characteristics of a compact latent heat thermal energy storage system for domestic hot water applications," *Energy*, vol. 188, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116083.

[47] Y. Bie *et al.*, "A novel empirical heat transfer model for a solar thermal storage process using phase change materials," *Energy*, vol. 168, pp. 222–234, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.107.

[48] O. F. Isamotu, N. A. Musa, O. J. Okegbile, M. A. Oriaifo, and A. O. Bak, "MATHEMATICAL MODELING OF A FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR WITH EUTECTIC SALTS AS PHASE CHANGE MATERIAL O. F. Isamotu,* N. A. Musa, O. J. Okegbile, M. A. Oriaifo and A. O. Bakare," *Arid Zo. J. Eng. Technol. Environ.*, vol. 16, no. September, pp. 435–448, 2020.

[49] D. Qin, Z. J. Yu, T. Yang, S. Li, and G. Zhang, "Thermal performance evaluation of a new structure hot water tank integrated with phase change materials," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 5034–5040, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.659.

[50] Z. Guo, Q. Bai, J. Hou, X. Yang, Y. Liu, and Y. Sun, "Experimental investigation on the melting behavior of phase change materials in open-cell metal foams in an inclined rectangular enclosure," *Energy Procedia*, vol. 152, pp. 215–220, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.083.

[51] S. Chavan, V. Gumtapure, and A. P. D, "Numerical and experimental analysis on thermal energy storage of polyethylene/functionalized graphene composite phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. August 2019, p. 101045, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101045.

[52] Y. Li, X. Liang, W. Song, T. Li, D. Wang, and Y. Liu, "Optimization and thermal performance of U-type evacuated tube solar collector filled with phase change material," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 6126–6138, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.04.054.

Presence of pesticides in the Chiriquí Viejo River, in agricultural areas of Cerro Punta, Chiriquí, Panama

Presencia de plaguicidas en el río Chiriquí Viejo, en zonas agrícolas de Cerro Punta, Chiriquí, Panamá

J. Olmos
Centro *Experimental de Ingeniería*
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
jorge.olmos@utp.ac.pa

C. Hernández
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
cecilio.hernandez@utp.ac.pa

J. Lloyd
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
javier.lloyd@utp.ac.pa

E. Salazar
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
elizabeth.salazar@utp.ac.pa

A. González
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
ana.gonzalez1@utp.ac.pa

K. Broce
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
kathia.broce@utp.ac.pa

D. Borrero
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
denise.borrero@utp.ac.pa

***Abstract*— Through the present work, the river Chiriquí Viejo, Chiriquí, which is an area of high agricultural activity, is evaluated, and the presence of ten pesticides is determined, observing that the pesticide with the highest frequency was observed in the 30 samples evaluated. , is Dieldrin (33%) followed by Endrin (17%), while the highest levels decreased in the pesticide pp DDT (with 13% persistence) presented the highest average concentration with 9.7 μg/ L, followed of Simaza (13% persistence) with 6.8 μg/L. From the bibliographic review carried out, the limited information on previous studies that involve analysis of pesticides in natural sources will be revealed, so it is an opportunity to contribute to it to carry out the necessary national management to strengthen this field of action..**

Keywords*— *Plaguicidas, GC.masas, Dieldrin, Endrin, pp DDR, Simaza

***Resumen* — A través del presente trabajo se evalúa la cuenca de río Chiriquí viejo, Chiriquí, que es una zona de alta actividad agrícola, y se determina la presencia de diez plaguicidas, observándose que el plaguicida con mayor frecuencia se observa en las 30 muestras evaluadas, es el Dieldrin (33 %) seguido del Endrin (17 %), mientras que los niveles más elevados se observó en el plaguicida pp DDT (con 13 % de persistencia) presentó la concentración promedio más elevada con un 9,7 μg/L, seguido del Simaza (13 % de persistencia) con 6,8 μg/L. De la revisión bibliográfica efectuada se advierta la información limitada sobre estudios previo que involucren análisis de plaguicidas en fuentes naturales, por lo que es una oportunidad de contribuir y aportar la gestión nacional necesaria para fortalecer este campo de acción.**

Palabras claves* — *Pesticides, GC.masses, Dieldrin, Endrin, pp DDR, Simaza /.

I. INTRODUCCIÓN

La preservación de las fuentes de agua natural está considerado en los ODS de la ONU, a través del Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, que nos hace un llamado a cuidar este recurso en vista que es la fuente de abastecimiento del agua consumo humano, y de utilidad para los productos agrícolas de nuestra alimentación; y a su vez en el Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos, ya que los ríos suelen desembocan en el mar, y su contaminación afecta de manera directa estos recursos [1]. La gestión de los plaguicidas en el país, sobre todo de parte de las entidades rectoras al respecto, refleja una diversidad de limitaciones, que se originan por lo complicado y sensitivo que implica su y

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00104

disposición, que conllevan alto grado de riesgos. Un factor crítico es la falta de Laboratorios e infraestructura de alto nivel dedicados exclusivamente a los análisis de plaguicidas en aguas naturales y sedimentos, que es costosa, incluyendo su mantenimiento. Sobre los temas regulatorios habría que revisarlo sin embargo, hoy día, con lo conectado que está la sociedad permite acceder a ejemplos de países vecinos que ya se han adelantado en el tema, lo que daría cabida a la adopción de leyes adecuadas, luego de su revisión interinstitucional. Un aspecto que preocupa son los aspectos educativos vinculados, que son limitados, en todos los niveles, y en donde se debe hacer un esfuerzo en reforzar, sobre todo desde la niñez. En este contexto se puede decir que incluso a nivel de las universidades, por años no se contó con equipamiento de análisis, solo muy reciente en las a nivel público ya se cuenta con equipamiento de alto nivel para análisis de plaguicidas, lo que explica la baja producción científica sobre el monitoreo y análisis de plaguicidas en agua naturales. En vista de ello, la Universidad Tecnológica de Panamá, ha hecho un esfuerzo en contribuir en el tema, a través del Proyecto SENACYT EIE17-021 "Evaluación del riesgo ambiental por residuos de plaguicidas en zonas de agricultura intensiva en Panamá", a través del cual se tiene previsto la evaluación de 3 cuencas importantes del país, localizadas en las provincias de Chiriquí, Coclé y Panamá oeste, donde existe una producción agrícola importante, y por ende consumo igual de plaguicidas. En la presente contribución y como parte del proyecto, se tiene previsto efectuar una revisión de la información de trabajos previos efectuados sobre niveles de plaguicidas en aguas de afluentes naturales, en especial los próximos a la actividad agrícola, las regulaciones disponibles en el país, que permita ubicar la información sobre la gestión de los plaguicidas, en particular, sobre análisis de los niveles de los mismos, ya sea en el agua o los sedimentos de las cuencas de interés.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Antecedentes de trabajo de monitoreo de plaguicidas en el país

La revisión de la información técnica disponible, referente al desarrollo de análisis de plaguicidas en agua de ríos y lagos, así como en sedimentos, es muy limitada actualmente en el país. La mayor parte de los esfuerzos y contribuciones se basan en revisiones de las cantidades de consumo de plaguicidas, que se reporta en el INEC, por ejemplo, que permiten inferir y modelar su presencia potencial en las cuencas estudiadas. Pero hay pocos casos en que se presenta el desarrollo de un análisis formal.

A continuación se exponen algunas de estas contribuciones y esfuerzos científicos, todos considerados válidos dentro del alcance particular propuesto, pero que se pueden considerar como punto de partida para dirigir el esfuerzo en avanzar en un plan de monitoreo de plaguicidas en las cuencas de alto interés estratégico para el país.

En primera instancia se puede mencionar los trabajos derivados de un seminario celebrado en Divisa, Panamá, del 22 al 24 de abril de 1981, sobre el Uso de Plaguicidas en Panamá, su efecto en la Salud y el Medio Ambiente, auspiciado por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los E.E.U.U. (A.I.D.) y el Consorcio Internacional para la Protección de Cultivos (C.I.C.P.), (editado por Parillón, Trujillo y Martiz, 1982), organizado por el MINSA y el MIDA [2]. Se abordaron temas diversos desde los temas de salud, las causas de la necesidad de su uso en aquel entonces. Ya en ese momento era de preocupación lo referente a los impactos en la salud humana y ambiental. Se tocaron puntos importantes como: El papel de las Leyes y Regulaciones en el Manejo de los Plaguicidas, Normas Nacionales sobre el Uso de Plaguicidas y la Aplicación de los Reglamentos sobre Plaguicidas en el Ministerio de Salud. Se sostenía la idea que si los plaguicidas se usan legal y adecuadamente bajo condiciones seguras y normales, no debería presentar riesgos inmoderados para las personas o el ambiente.
Se hizo énfasis en la necesidad de enforcar recursos en; fomentar programas educativos para los usuarios en el uso y aplicación seguros de los materiales registrados, verificar los niveles de residuos en los cultivos y a verificar las actividades de cumplimiento. La aplicación de los Reglamentos sobre Plaguicidas recaía en el Ministerio de Salud, y en Departamento de Farmacias y Drogas del Ministerio de Salud, de acuerdo con lo estipulado en el Decreto 93 del 16 de febrero de 1962, era la responsable del Control y Registro Sanitario de productos como los plaguicidas, como se exigía el Código Sanitario. El Decreto No. 256 del 13 de junio de 1962, mediante el cual se aprueba el Reglamento para el Registro y Control de Alimentos y Bebidas, en su artículo 54 establecía, entre otros aspectos, las tolerancias para los residuos de 42 plaguicidas. Los análisis de plaguicidas se realizaban en los Laboratorios Especializados de Análisis de la Universidad de Panamá (LEA).

En el año 1995, el Ministerio de Planificación y Política Económica, a través de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, efectuó un estudio preliminar sobre niveles de concentración de residuos de plaguicidas organoclorados en peces y sedimentos de ríos de la provincia de Bocas del Toro en vista de los altos niveles de organoclorados utilizados para la producción bananera. (MPPE, 1995) [3]. Programa para la Evaluación y Control de la Contaminación en la Región del Gran Caribe (CEPPOL), inserto en el Programa de

Mares Regionales, PNUMA. Se efectuaron análisis de peces y sedimentos, de varios ríos, reportándose niveles de plaguicidas clorinados totales en sedimentos, en el rango de 6,9 a 36 ng/g, sin embargo, no se informa de mayores detalles técnicos utilizados en su realización.

En el año 2000, Organismo Internacional de Sanidad Agropecuaria-OIRSA. Proyecto Regional de Fortalecimiento de Vigilancia Fitosanitaria no Tradicional -VIFINEX, con financiamiento de China, preparó y entregó un Manual Técnico sobre el Uso y manejo seguro de plaguicidas en el cultivo de la piña, 2000 [4].

En el año 2005, Dominguez et al. [5], se estudió la cuenca del río David en la provincia de Chiriquí, República de Panamá, y haciendo uso de los niveles de uso de plaguicidas en la zona de esta cuenca, en particular del 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D) y el 2-Methyl-4-ácido clorofenoxiacético (MCPA), y otras variables, y desarrollaron un Modelo de Estudio de Gestión de esta cuenca para los plaguicidas indicados, no obstante, se trata de un modelado no hay data de análisis.

En el año 2018, se aprueba y adopta la Norma de Vigilancia Epidemiológica de las Intoxicaciones agudas por plaguicidas. Resolución No. 1630 del 24 de diciembre del 2018, que se orienta al impacto de los plaguicidas hacia el ser humano [6].

En el año 2019, Garcerán y Castillo [7], hacen una revisión de los plaguicidas para uso agrícola, nivel de importación del país de acuerdo al INEC, los tipos de plaguicidas utilizados, y las tasas de intoxicación, entre otros temas abordados, pero no incluyen información de los niveles en el agua natural.

En el año 2020, Carranza e Jimenez [8], presentan el documento Situación actual de los plaguicidas altamente peligrosos en Panamá, donde se hace una revisión del manejo de este tipo de productos, registro, el laboratorio de ensayo, su manejo, acciones para a minimizar el uso de plaguicidas de mayor riesgo como el paraquat, clorpirifos y otros, se presentan los plaguicidas utilizados aún en Panamá pero prohibidos en otros países, y los convenios en los que estamos comprometidos en adoptar como país, referente al manejo de plaguicidas.

Recientemente Muñoz et al. [9], efectuaron una recopilación de información disponible en el país, los consumos y la estimación de la descarga en los ríos del país, sin embargo dentro de sus recomendaciones hacen énfasis en la necesidad de contar con laboratorio de alto nivel, para el desarrollo de las determinaciones analítica de los plaguicidas en aguas.

Resumiendo, dentro del alcance de la literatura consultada, que no es extensa en el país, se advierta la necesidad de realizar esfuerzos para fomentar el desarrollo de estudios e investigaciones que contemplen la realización de análisis de plaguicidas, tanto en medios acuosos como en sedimentos, a fin de evaluar su persistencia, transformación, distribución, movilidad, etc., en acuíferos como el río Chiriquí Viejo, como en otros importantes afluentes del país.

2.2. Materiales y métodos y Análisis Químicos

2.1. Área de estudio

La cuenca objeto de estudio es el río Chiriquí Viejo, localizado en la provincia de Chiriquí, y su longitud es de 161 km y una cuenca de 1376 km². Nace próximo a Cerro Punta y desemboca en Puerto Armuelles. En la figura 1 se presenta una imagen de su recorrido y desembocadura [10].

.

Fig. 1. Imagen de recorrido y desembocadura del río Chiriquí Viejo

Sus coordenadas de localización GPS son 8°52′26.75″N 82°38′17.92″O (Nacimiento) y 8°19′39″N 82°42′07″O (desembocadura).

2.2.Descripción de la metodología

2.2.1 Muestreo y análisis de plaguicidas en agua

A lo largo de la cuenca del río Chiriquí Viejo se colecto 30 muestras de 6 sitios (5 monitoreos por sitio), focalizados en la zona agrícola de Cerro Punta, en el período entre agosto-noviembre del 2021. La colecta, preservación y análisis de plaguicidas se efectuaron de acuerdo a los procedimientos del Standard Methods for

the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition, 2017, APHA-AWWA-WEF [11]. Se colecto cerca de 1 litro de muestra. Como método de extracción se utilizó la extracción en fase sólida. Para la identificación de los plaguicidas en las muestras de agua, un cromatógrafo de gases con detector de masas shimadzu QP 2010, Las condiciones de análisis son las siguientes: columna 30 metros 0.25x0.25; inyección splitless a 280°. Como método de control de calidad se corrieron muestras de blanco, adición de estándar y se utilizó un material de referencia certificado, para la calibración y controles de calidad de la técnica.

3. Resultados y discusión

Los resultados de los análisis de plaguicidas en las 30 muestras de agua procedentes de los 6 sitios de Cerro Punta, en la cuenca del río Chiriquí viejo, mostraron una alta aleatoriedad, y no permiten establecer ningún tipo de correlación sobre los sitios y los monitoreos efectuados. Razón por la cual se presentan los mismos en la tabla 1, en términos globales, indicando los plaguicidas observados, una columna sobre % de detección, la cantidad con respecto al total de muestras analizadas donde se detecta la presencia del plaguicida (en porcentaje), y además, otra columna identificada como concentración, que corresponde al promedio de los valores obtenidos. Se puede observar la detección de un total de 10 plaguicidas en las muestras estudiadas, siendo el dieldrin el de mayor persistencia observado (33 %), seguido del endrin (17 %). Sin embargo, el plaguicida pp DDT (con 13 % de persistencia) presentó la concentración promedio más elevada con un 9,7 µg/L, seguido del Simaza (13 % de persistencia) con 6,8 µg/L.

Tabla1. Resultados de análisis de plaguicidas por cromatógrafía de gases con detector de masas de muestras procedentes del río Chiriquí viejo.

Plaguicidas	% de detección *	Concentración promedio (µg/L)
ALACHLOR	13	2.2
ALDRIN	4	4.3
DIELDRIN	33	3.9
ENDRIN	17	4.8
HCB	4	3.2
HEPTACHLOR	4	4.7
HEPTACHLOR EPOXIDE	8	4.6
METOXICLORO	4	1.9
pp DDT	13	9.7
SIMAZINA	13	6.8

***N=30 (muestras colectadas en diferentes zonas con actividad agrícola)**

En cuanto a los antecedentes con otras referencias, con estudios nacionales ya se ha indicado que son muy escasos, mientras que a nivel de fuentes externas, se puede mencionar los trabajos de Hernández-Antonio y Hansen [12] quienes no detectaron en agua naturales Dieldrin, ni Aldrin, ni Simazina, pero si reportaron DDT de 0,03 mg/L. De acuerdo a estos autores, los límites para la protección de la vida acuática según la Guía canadiense de Calidad del Agua para Protección de la Vida Acuática (CCEM 2003), es de 2 µg/L para el Dieldrin y 10 µg/L DDT, que se pueden considerar como valores en el mismo orden de magnitud, a los reportados en el presente trabajo, con lo que se puede considerar a los valores obtenidos en el río Chiriquí Viejo, como niveles críticos, según esta guía. A su vez, Benitez et. al [13], en Venezuela, reportó niveles máximos de Mencozeb, 42,96 µg/L, el cual no está presente en el presente trabajo.

Desde el punto regulatorio, hay pocas guías disponibles en el país y a nivel internacional, dirigida exclusivamente al establecimiento de los límites de plaguicidas en agua natural.

4. Conclusiones

Se puede considerar que los resultados permiten identificar claramente la presencia en la cuenca del río Chiriquí Viejo, la presencia de plaguicidas en niveles, que de acuerdo a guías internacionales, son de riesgo. Se detecta con mayor persistencia los plaguicidas: Dieldrin y Aldrin, mientras que las concentraciones promedio más elevadas fueron detectadas en el pp DDT y la Simazina. Consideramos que este trabajo constituye un punto de inicio para el desarrollo de la infraestructura que se debe garantizar, para el desarrollo de investigaciones en materia de plaguicidas y su impacto en los recursos hídricos del país.

Agradecimiento

Este trabajo fue apoyado por el Proyecto SENACYT EIE17-021 “Evaluación del riesgo ambiental por residuos de plaguicidas en zonas de agricultura intensiva en Panamá.

Referencias

[1] https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

[2] Seminario celebrado en Divisa, Panamá, del 22 al 24 de abril de 1981, sobre el Uso de Plaguicidas en Panamá, su efecto en la Salud y el Medio Ambiente, auspiciado por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los E.E.U.U. (A.I.D.) y el Consorcio Internacional para la Protección de Cultivos (C.I.C.P.), (editado por Parillón, Trujillo y Martiz, 1982), organizado por el MINSA y el MIDA

[3] Estudio preliminar sobre niveles de concentración de residuos de plaguicidas organoclorados en peces y i sedimentos del río San San, provincia de bocas del toro, república de Panamá. Comisión Nacional del Medio Ambiente 1995

[4] Organismo Internacional de Sanidad Agropecuaria-OIRSA. Proyecto Regional de Fortalecimiento de Vigilancia Fitosanitaria no Tradicional -VIFINEX, con financiamiento de China, preparó y entregó un Manual Técnico sobre el Uso y manejo seguro de plaguicidas en el cultivo de la piña, 2000

[5] Domínguez et al., 2005; Modelo de gestión de cuencas para la prevención y control de la contaminación por 2,4-D y MCPA, XXX Congreso Internacional de Ingeniería sanitaria y Ambiental, 26 al 30 de noviembre del 2006. Punta del este Uruguay.

[6] Norma de Vigilancia Epidemiológica de las Intoxicaciones agudas por plaguicidas. Resolución No. 1630 del 24 de diciembre del 2018, que se orienta al impacto de los plaguicidas hacia el ser humano.

[7] Garcerán y Castillo, hacen una revisión de los plaguicidas para uso agrícola, nivel de importación del país de acuerdo al INEC, los tipos de plaguicidas utilizados, 2019.

[8] 2019, Garcerán y Castillo, hacen una revisión de los plaguicidas para uso agrícola, nivel de importación del país de acuerdo al INEC, los tipos de plaguicidas utilizados.

[9] Muñoz et al., efectuaron una recopilación de información disponible en el país, los consumos y la estimación de la descarga en los ríos del país,

[10] https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_Chiriqu%C3%AD_Viejo

[11] Procedimientos del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition, 2017, APHA-AWWA-WEF

[12] Hernández-Antonio y Hansen. Rev. Int. Contam. Ambie. 27 (2) 115-127, 2011

https://pdfs.semanticscholar.org/d676/fccacb56da2d73b0fb4c106a2a593a141ccc.pdf

[13] BENÍTEZ-DÍAZ, Pedro; MIRANDA-CONTRERAS, Leticia. CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES POR RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN VENEZUELA Y OTROS PAÍSES DE LATINOAMÉRICA Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 29, septiembre, 2013, pp. 7-23 Universidad Nacional Autónoma de México Distrito Federal, México.

Investment opportunities that can be generated by the production and distribution of green hydrogen for Panama

Oportunidades de inversión que puede generar la producción y distribución de hidrógeno verde en Panamá

Héctor Deago[1], José Santos[1], Nicole Barría[2]
[1]Licenciatura en Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería Industrial - Universidad Tecnológica de Panamá,
[2]Departamento de Estadística y Economía – Facultad de Ingeniería Industrial – Universidad Tecnológica de Panamá

***Abstract*—**The term "green hydrogen" refers to hydrogen generated by segregating the hydrogen from oxygen molecules in the water through an electrolysis process that uses only renewable energy. Its use as an energy vector is an attractive alternative for many countries seeking to minimize the consumption of fossil fuels, as well as the emissions generated in energy production processes and different commercial activities. Panama is also betting on green hydrogen. The National Energy Secretariat published in the official Gazette Phase 1 of Panama's green hydrogen roadmap, which details different strategies to turn Panama into an international green hydrogen hub. A comparison was made between the investment projects that currently exist in countries that have already adopted the use of green hydrogen as an energy vector, and the strategies presented in this roadmap; in order to explain the usefulness of green hydrogen in activities that result in investments for Panama. For this purpose, was necessary to realize a literature review of national, regional and global reports on this topic. Once completed, was possible to conclude that investments related to green hydrogen in Panama should take advantage of the logistics infrastructure of the Canal; the options with the greatest potential were production and distribution of green hydrogen, which includes industries such as: naval, aeronautics, and mining; in addition to hydrogen plants that enhance the use of hydrogen-powered transportation.**)**

Keywords —Distribution, energy, green hydrogen, investments, opportunities, production, renewable energy.

***Resumen* —** El término “hidrógeno verde” se refiere al hidrógeno generado al separar moléculas de hidrógeno y oxígeno del agua, mediante un proceso de electrólisis que utiliza solamente energía renovable. Su utilización como vector energético es una alternativa atractiva para muchos países que buscan disminuir el consumo de combustibles fósiles, así como las emisiones generadas en los procesos de producción de energía y diferentes actividades comerciales. Panamá también apuesta por el hidrógeno verde. La Secretaría Nacional de Energía publicó en Gaceta oficial la Fase 1 de la hoja de ruta de hidrógeno verde de Panamá, donde se detallan diferentes estrategias para convertir a Panamá en un Hub internacional de este combustible. Se realizó una comparación entre los proyectos de inversión que existen actualmente en países que ya han adoptado la utilización del hidrógeno verde como un vector energético, y las estrategias que se presentan en esta hoja de ruta con el objetivo de explicar la utilidad que representa el hidrógeno verde en actividades que resulten en inversiones para Panamá. Para ello se realizó una revisión literaria, de reportes nacionales, regionales y globales sobre este tema. Una vez finalizada la misma se concluyó que las inversiones relativas al hidrógeno verde en Panamá deben aprovechar la infraestructura logística del Canal. Las opciones de mayor potencial fueron: producción y distribución de hidrógeno verde, la cual incluye industrias como: naval, aeronáutica, y minera; además de las hidrogeneras que potencien el uso de medios de transporte propulsados por hidrógeno

Palabras claves — Distribución, energía, energías renovables, hidrógeno verde, inversión, oportunidades, producción.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la utilización del Hidrógeno verde como vector energético es una de las soluciones más atractivas para muchas industrias y países que buscan migrar hacia el uso exclusivo de energías renovables. Panamá se encuentra entre los países que han mostrado interés en esta alternativa; por ende, la Secretaría Nacional de Energía publicó en Gaceta Oficial la Fase 1 de la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Panamá, donde se exponen las intenciones de aprovechar el Canal de Panamá, así como la posición privilegiada del país, para convertirlo en un Hub Internacional de Hidrógeno verde [1]. Las oportunidades de inversión, en Panamá, gracias al proyecto HUB internacional del hidrógeno verde, van a ser determinantes para el crecimiento económico y una posible revolución energética a nivel nacional los próximos años. Por ello, resulta importante, dar a conocer los beneficios ofrecidos por este elemento frente a las demás alternativas energéticas existentes. Mediante la ejecución de esta investigación, se explicará la utilidad que representa el hidrógeno verde en las diferentes actividades económicas, que luego puedan resultar en inversiones; examinando los métodos necesarios para hacer rentable producir este elemento, además de sus costos, su almacenamiento y su transformación. Finalmente se comparará la situación en Panamá con la de otros países que ya han sido exitosos en sus estrategias de hidrógeno verde, e intentar hacer proyecciones a futuro.

II. ANTECEDENTES

Según el Instituto Catalán de Energía: “La Energía es la capacidad de realizar un trabajo, es decir, cualquier cosa que implique un cambio, ya sea un movimiento, un cambio de temperatura, transmisión de ondas; etc.” [2].

Según la Fundación ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad S.A) de España; la energía se manifiesta de diferentes maneras, en forma de Energía Potencial, Energía Cinética, Energía Eléctrica, Energía Interna, Energía Mecánica, Térmica, Química y Nuclear [3].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00105

La forma de producción de energía más común siempre ha sido la utilización de aquella energía química contenida en los llamados combustibles fósiles, que aún hoy son la base para la producción de energía eléctrica y también proveen la energía necesaria para llevar a cabo infinidad de actividades comerciales; con la desventaja de que deben ser combustionados, emitiendo distintos gases que en exceso son contaminantes y perjudican el medio ambiente; sobre todo el CO2, principal responsable del llamado "Efecto Invernadero", en el cual la cantidad de este gas en la atmósfera hace que el calor generado en la tierra no pueda ser evacuado, quedándose en la superficie y generando el calentamiento global.

Para prevenir el aumento de la contaminación, han surgido las "Energías Renovables", que utilizan fuentes como el sol, el agua, el viento, el calor de la tierra, entre otras; que son constantes en la naturaleza y, además, se puede obtener energía de estas sin necesidad de emitir contaminantes a diferencia de los combustibles fósiles; sin embargo, se siguen utilizando [4].

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) entre 1990 y 2019, las emisiones mundiales de CO2 aumentaron en un 54% y después de la pandemia el aumento fue mayor, por lo que los gases de efecto invernadero han alcanzado el su nivel más elevado en la historia de la humanidad; y existe una preocupación real por los elevados niveles de contaminación en el planeta [5].

Ante esto, destaca la alternativa de utilizar el Hidrógeno verde como vector energético, tanto para ser combustionado directamente como para ser utilizado en celdas de combustible para la generación de electricidad; con la gran ventaja de que su residuo es solo vapor de agua, el cual es inocuo para el medio ambiente; y no depende de condiciones ambientales específicas como sí dependen la energía solar o la eólica. Es el elemento que posee más energía en función de su masa y el más abundante del universo conocido [6].

El Hidrógeno consta de tres clasificaciones en función de la forma en que se produce; el "Hidrógeno Gris" es producido a partir de combustibles fósiles, los cuales generan CO2; el "Hidrógeno Azul", que si bien su producción sí emite dióxido de carbono, este se captura y se le dan otros usos para reciclarlo sin que perjudique la atmósfera; y el "Hidrógeno Verde", que se produce realizando un proceso de electrólisis al agua, separando el hidrógeno y el oxígeno, utilizando electricidad proveniente exclusivamente de fuentes de energía renovables. Este último, es la clave para lograr los objetivos de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, y está acaparando la mayor atención en la confección de las matrices energéticas en los países al día de hoy [1].

Muchos países se van a sumar a la alternativa "Hidrógeno Verde", tanto para producirlo y exportarlo, como para importarlo. Entre los sitios que se convertirán en los principales productores tenemos a: Países pertenecientes al continente africano, Arabia Saudita y Australia. La alta demanda de este recurso, principalmente en países más avanzados (Europa occidental), es una gran oportunidad para países en vías de desarrollo como los de América Latina y el Caribe, los cuales poseen un gran potencial para convertirse en grandes productores de hidrógeno verde a bajo costo.

III. Planteamiento del problema

La Secretaría Nacional de Energía de Panamá está implementando la hoja de ruta del proyecto de HUB transformacional de hidrógeno verde de Panamá, para acelerar la transición del país hacia energías renovables [1].

Sin embargo, nos enfrentamos a países competidores en este rubro, que ya constan de una ubicación más cercana, y una infraestructura prácticamente terminada; es aquí donde nace la idea de posicionar a Panamá como un HUB de hidrógeno verde, donde se planea transformar, luego producir este recurso ya refinado, para finalmente exportarlo. Esto será posible gracias a que nuestro país consta de una ubicación privilegiada, con la ruta marítima más importante, transitada e ideal para distribuirlo alrededor del mundo [1].

El proyecto plantea, además, estrategias y una completa formulación donde, a la vez, describe detalladamente cómo nuestro país puede tener la infraestructura necesaria para lograr esta meta (Plantas transformadoras, ductos, centros, puertos, almacenadores y distribuidores); esto abre puertas a nuevas industrias e inversiones que pueden ser muy provechosas para la economía del país [1].

Vemos necesario identificar las actividades económicas, inversiones y demás, que podría traer la producción y distribución de Hidrógeno Verde a nuestro país, que generen así muchos empleos e impulsen la economía nacional, actualmente muy golpeada por la pandemia; por ende, llegamos a la siguiente pregunta:

Pregunta de Investigación:

¿Qué nuevas oportunidades de inversión podría traer a Panamá la producción y distribución del Hidrógeno Verde?

IV. Objetivos

a) Objetivo General:

Explicar la utilidad que representa el Hidrógeno verde en las diferentes actividades que pueden resultar en inversiones para Panamá.

b) Objetivos Específicos:

- Explicar el proceso para obtener el Hidrógeno Verde en el marco del proyecto del Hub Transformacional de Hidrógeno verde de Panamá.
- Identificar las diferentes oportunidades que se presentan al país en cuestión de actividades generadoras de empleo que impulsen el desarrollo económico.
- Examinar los métodos para la producción de hidrógeno verde, sus costos, almacenamiento y transformación.
- Analizar por qué podría ser, o no, algo beneficioso para nuestro país, y de qué manera podría impactar a nuestra sociedad económica, ambiental y tecnológicamente hablando.
- Comparar la situación de Panamá con la de otros países que han sido exitosos en sus estrategias de hidrógeno verde, e intentar hacer proyecciones respecto a Panamá.

V. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La utilización del hidrógeno verde como vector energético soluciona gran parte de los inconvenientes que presenta la utilización de otros tipos de energía renovable, suponiendo muchas ventajas que han sido identificadas por numerosas empresas alrededor del mundo, así como por los gobiernos de diferentes países, los cuales han elaborado estrategias para poco a poco migrar hacia la utilización de este recurso para la generación de energía sin contaminación, y además para descarbonizar numerosas actividades comerciales que dependan de los combustibles fósiles. Esto incluye a Panamá, que en la Fase 1 de la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde, elaborada por la Secretaría Nacional de Energía (Gaceta Oficial No.29461-A de 24 de enero del 2022) establece el camino a seguir para establecer nuestra competitividad en la región, aprovechando la infraestructura logística actual del Canal para convertir al país en un "Hub de hidrógeno verde" en un plazo mediano/largo, y teniendo en cuenta que los principales usuarios del Canal poco a poco se involucran con esta forma de producción de energía [1].

Esta investigación se hace para explicar el potencial del Hidrógeno verde y de la infraestructura que se planea crear, para posibles proyectos de inversión que ayuden a generar ingresos adicionales para el país, así como nuevas plazas de trabajo, y que sirvan para reactivar nuestra economía luego de 2 años de pandemia.

También se explorarán diferentes oportunidades de negocio que se han generado en países donde el hidrógeno como vector energético ya juega un papel importante, comparándolas con los planes trazados en la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Panamá, e identificando qué oportunidades de inversión, que generen buenos resultados para el país, podrían estarse dejando de lado; y cómo estas se podrían implementar efectivamente.

VI. METODOLOGÍA

La metodología para alcanzar los objetivos de nuestra investigación se basa en la revisión exhaustiva de la literatura concerniente a este tema. Para agilizar el proceso, identificamos una variable que, en base a determinados indicadores, facilitará el alcance de nuestros objetivos. A continuación, el cuadro de variables, y el cuadro operacional de variables:

TABLA I. CUADRO DE VARIABLES

Oportunidades de Inversión	
Variable	***Dimensiones***
Industrias para invertir en Panamá	Industria Minera
	Industria de Transporte Terrestre
	Industria de Transporte Aéreo y Marítimo

TABLA II. CUADRO OPERACIONAL DE VARIABLES

Variable	***Definición Conceptual***	***Dimensiones***	***Subdimensiones***	***Definición Operacional***	
				Indicadores	***Tipo de Variable***
Oportunidades de inversión	Inversión: dedicar un recurso a algo o alguien (tiempo, dinero, dedicación), con la finalidad de obtener un beneficio o retorno a futuro.	Tipos de Inversión	Acciones	Diferentes empresas que estén en proceso transitorio hacia el uso de hidrógeno verde	Cuantitativa
			Materia Prima / Infraestructura	Instrumentos, maquinaria, medios de transporte, plantas de transformación	Cuantitativa
		Viabilidad	Ventajas	Industria en gran auge, proyectada a crecer exponencialmente	Cuantitativa
			Desventajas	Retorno de inversión a mediano/ largo plazo	Cuantitativa

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Proyecciones Internacionales del mercado del Hidrógeno:

Actualmente existe un Consejo de hidrógeno, formado por más de 130 compañías líderes en la industria del transporte y la energía, que busca aumentar la inversión en el desarrollo de tecnologías relacionadas con el hidrógeno verde [1].

Según la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Panamá, este Consejo emitió el informe "Camino hacia la Competitividad del Hidrógeno: Una perspectiva de costos"; donde relata que, para bajar los costos de la obtención de energía a partir del hidrógeno, es necesario aumentar masivamente la producción y distribución del mismo, la fabricación de equipos para utilizarlo como vector energético y componentes para darles servicio de mantenimientos a largo plazo. Así; los costos podrían disminuir hasta un 50% para el año 2030 [1].

También se mencionan proyecciones del Foro Económico Mundial, según el cual los 70 mil millones de dólares americanos que se requieren en inversión para escalar la competitividad del hidrógeno; son menos que los 1.85 billones de dólares americanos del gasto anual mundial de energía [1].

La idea de la hoja de ruta de Hidrógeno Verde de convertir a Panamá en un Hub internacional de hidrógeno verde debe ir de la mano con las políticas energéticas que desarrollen los principales usuarios del Canal de Panamá respecto a este tema. Panamá igual puede aprovechar la oportunidad y cooperar con este desarrollo como vía de tránsito para así atraer inversiones provechosas para el país y para los principales usuarios del Canal [1].

En la Fig. 1. se muestra una ilustración del plan trazado en esta hoja de ruta:

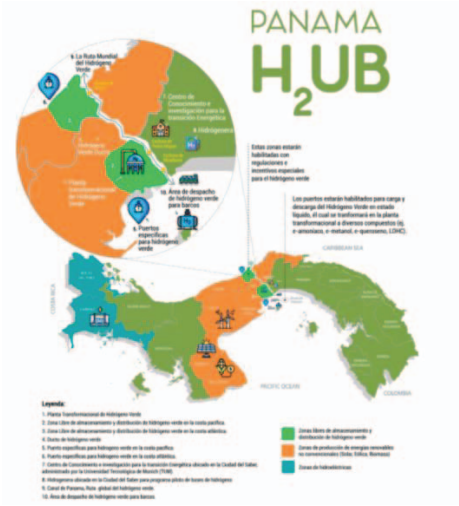


Fig. 1. Panamá como Hub energético del Hidrógeno verde [2].

B. Acciones que puede tomar Panamá para atraer inversiones relativas al hidrógeno verde:

Potenciar la demanda interna: Para que Panamá pueda convertirse en un Hub Internacional de Hidrógeno verde; es imprescindible que se comience a dar incentivos y se tomen las acciones necesarias para incrementar la demanda interna del mismo.

Se debe asegurar un consumo base del hidrógeno verde en la población y los sectores primarios de la economía, para establecer una demanda autogenerada saludable; como, por ejemplo, lo que hizo Australia, donde se crearon clústeres de hidrógenos de demanda de gran escala ubicados en distintos puertos, ciudades o inclusive áreas regionales o remotas.

A su vez, están complementados y mejorados por otros pasos tempranos en el uso de hidrógeno en: transporte, industria y redes de distribución de gas; e integran tecnologías de hidrógeno en sus sistemas de electricidad de tal forma que mejora la confiabilidad del producto [7].

Incentivar la Investigación y Desarrollo (I+D) de proyectos ligados al Hidrógeno Verde: Para que Panamá se convierta en un Hub de hidrógeno verde, se debe trabajar activamente para encontrar maneras en las que este recurso se puede aprovechar, así como formas en las que se pueda mejorar la logística del almacenamiento y distribución del mismo. Para ello, nuestro país debe incentivar el aprendizaje sobre todo lo referente al hidrógeno verde, y propiciar el desarrollo de proyectos que tengan el potencial de mejorar la capacidad que tengamos para manejar este recurso.

C. Oportunidades de inversión que puede generar la producción y distribución de hidrógeno verde en Panamá:

1) Expansión de sus usos en el transporte, minería y apertura de su comercialización internacional:

El hidrógeno verde tiene un gran potencial en **industria minera** ya que actualmente la misma necesita fijarse objetivos y estrategias de descarbonización de manera urgente. El responsable comercial de hidrógeno de la organización enfocada a la producción de energías renovables Enel Green Power, Lorenzo Ducci, afirmó que: "la industria minera debe contar con una perspectiva que combine electrificación, eficiencia energética, baterías e hidrógeno verde para aprovechar al máximo sus sinergias". Además, gracias a sus propiedades químicas el hidrógeno es utilizado en la producción de minerales verdes, por ejemplo: el acero [8].

Las empresas de este ámbito a nivel nacional pueden fomentar a nivel la investigación y desarrollo de tecnologías asociadas al hidrógeno verde, y asociarse con organizaciones como Enel Green Power para aumentar los usos del hidrógeno en este campo.

En el área de los activos relativos al hidrógeno verde que pueden ser de mucha relevancia en empresas dedicadas a la minería, actualmente existe un camión minero que utiliza el hidrógeno verde como combustible, llamado "Nugen", con el cual se proyecta ahorrar millones de litros de diésel anuales. Es capaz de generar 2MW de potencia, y cargar hasta 290 toneladas; por lo que sus capacidades y el ahorro que representa son una gran ventaja para las empresas dedicadas a la minería [9].

Fig. 2. Imagen del camión Nugen en Sudáfrica [9].

En **industria de transporte**, la utilización del hidrógeno como vector energético no es una novedad, ya que desde hace años circulan en algunos países diversos vehículos de celdas combustible de hidrógeno, cuyo sistema transforma el hidrógeno en electricidad para impulsar motores eléctricos, y solo emiten vapor de agua (H_2O) durante este proceso.

Varios países están optando por incentivar el uso de estos vehículos; por ejemplo, en Costa Rica; ya se aprovecha la capacidad de generación de energía a partir de hidrógeno verde por parte de la planta de la compañía Ad Astra Rocket; para impulsar un autobús y cuatro vehículos compactos que se mueven mediante el sistema de Pilas de Combustible de Hidrógeno [10].

Canadá, planea aprovechar el apogeo en la investigación y desarrollo de tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno y, a través de la Asociación Canadiense de Hidrógeno y celdas de Combustible (CHFCA por sus siglas en inglés), incentivar a que las empresas inviertan en estas nuevas tecnologías; por ejemplo, la empresa Hydrogenics para trenes de celdas de Hidrógeno, la empresa DANA para componentes de celdas de hidrógeno, así como la empresa Loop Energy para desarrollar camiones y maquinaria de trabajo basados en celdas de combustible de hidrógeno [11].

Fig. 3. Autobus con propulsion basada en pilas de combustible de hidrógeno [12].

En Estados Unidos, cuando la empresa automotriz Toyota lanzó al mercado la segunda generación de su auto a base de pilas de combustible de hidrógeno en 2021, el Toyota Mirai, lo ofreció con una tarjeta de regalo de 15000 dólares americanos en hidrógeno durante 3 años; y otros beneficios como una garantía de 8 años en el sistema de celdas de combustible y una garantía de 10 años en la batería híbrida del auto; buscando captar la atención de nuevos clientes y estimular la demanda de automóviles con este sistema de propulsión [13].
A continuación, se muestra una imagen de este vehículo:

Fig. 4. Toyota Mirai Limited de segunda generación [14].

Además, la empresa automotriz surcoreana Hyudai también cuenta con un modelo de automovil propulsado por hidrógeno, el "Nexo". Este auto se se muestra en la siguiente imagen:

Fig. 5. Hyundai Nexo Limited [15].

Ambas compañías cuentan con presencia en nuestro país, cada una consta de al menos un modelo a Hidrógeno, sin embargo, en los distribuidores de Panamá aún no se ofrecen estos modelos, hablamos del "Hyundai Nexo" a partir de $59435 y "Toyota Mirai" desde tan solo $49500. (Precios oficiales de venta en Estados Unidos) [14], [15].
Tanto el gobierno de Panamá como las empresas privadas pueden observar el tipo de incentivos que otros países ponen a aquellas empresas que invierten en investigación y desarrollo de tecnologías relativas a la fabricación y la utilización del Hidrógeno verde para atraer inversiones, así como brindar facilidades a los clientes que se interesen en adquirir productos con estas tecnologías, como es el caso de los beneficios por la compra de autos hidrógeno en otros países.
La utilización del hidrógeno como vector energético en el transporte y minería potenciará aún más la demanda interna en el país, atrayendo inversiones para la instalación de infraestructura de recargas de hidrógeno, como lo son las hidrogeneras; las cuales podrán aprovechar que Panamá se convierta en un Hub internacional de Hidrógeno verde.

2) Proyección a largo plazo de su uso en transporte aéreo y marítimo:
Panamá también puede aprovechar las oportunidades de inversión que puede acarrear la utilización del hidrógeno verde como vector energético para la fabricación de combustibles sintéticos o su uso en estado puro, para el transporte aéreo y marítimo ya que, al ser un Hub logístico el tránsito marítimo y aéreo en Panamá es intenso; por ende, es una buena oportunidad para que se incentive utilizar el hidrógeno verde como combustible en estas industrias; así como el uso de combustibles sintéticos basados en hidrógeno verde.
Esto atraería inversiones enfocadas a la producción y distribución de Hidrógeno verde en nuestro país, ya que la demanda se elevaría.

a) Industria Marítima:
Se ha comprobado que el hidrógeno es la mejor alternativa verde para ser el combustible de futuras embarcaciones ya que es ideal para operaciones de gran tonelaje y largo alcance, a diferencia de, por ejemplo, las baterías de litio. Muchas aplicaciones marítimas requieren una gran cantidad de energía, y es aquí donde se puede ver el enorme potencial del como combustible; siendo el elemento que posee más energía en función de su masa de todos los elementos conocidos. Además, no ocasionaría contaminación alguna en los océanos donde transitan estas embarcaciones, ya que el producto de la combustión del Hidrógeno es vapor de agua (H_2O) [16].
Por ello, la idea de tener grandes tanques de almacenamiento y reserva de hidrógeno verde; así como de combustibles sintéticos basados en Hidrógeno verde; representa una gran oportunidad para nuestro país gracias a su posición estratégica y al Canal de Panamá [2].

b) El tráfico marítimo:
Cabe resaltar que, se deben utilizar y aprovechar los canales de entendimiento en el comercio marítimo existentes para ser privilegiados por participar en las primeras rutas de transporte y uso de hidrógeno. Debemos aprovechar que Chile planea ser el productor más económico de Hidrógeno, y que los países con mayor demanda son aquellos de la Unión Europea, que buscan alternativas energéticas eco-amigable, como el hidrógeno verde [2], [17].
La ruta más eficaz para conectar ambas regiones es el canal de Panamá. Por ende, la industria del transporte marítimo es posiblemente, la más importante de todas. Un gran incentivo sería darles descuento u ofrecer paquetes con beneficios especiales, a todas aquellas embarcaciones que transporten hidrógeno verde o funcionen propiamente con este recurso, al atravesar el canal.
En la actualidad, ya se están desarrollando barcos con sistemas de propulsión a hidrógeno, como el proyecto noruego "Hyship", patentado por 14 organizaciones europeas, en el que se está desarrollando un buque de carga cero emisiones, basadas en hidrógeno verde; el prototipo llamado "Topeka" cuenta con más de 20 MW de potencia, planea iniciar operaciones a partir de 2024 en las costas noruegas. Actualmente no se cuenta con costos de fabricación y venta de este barco, ya que aún se encuentra en desarrollo [18].

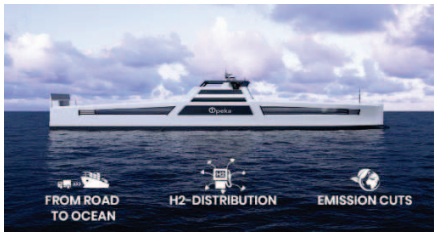


Fig. 6. Barco con propulsion basada en pilas de combustible de hidrógeno [18].

Además, en el año 2021, el barco Energy Observer transitó por el Canal de Panamá. Este es el primer barco cuyo sistema de propulsión se basa en una combinación de energías 100% renovables, y se fundamenta en un sistema de baterías, y otro de hidrógeno verde. Como este barco es el primero de su tipo, actualmente no se cuenta con un precio de venta del mismo [19].

Fig. 7. Barco Energy Observer pasando por el Canal de Panamá [19].

c) Industria de transporte aéreo

El transporte aéreo es uno de los sectores con más dificultades para alinearse con los objetivos climáticos, por lo que se han puesto en marcha iniciativas para reducir su huella de carbono, como viabilizar a mediano plazo los primeros aviones para aerolíneas comerciales que usarán hidrógeno de combustible.

Compañías como Airbus han comenzado a desarrollar aviones cuya fuente de energía sea únicamente hidrógeno, se estima que en 2035 ya deben estar los primeros ejemplares en servicio. Otra organización es ATI (Instituto de Tecnología Aeroespacial de Reino Unido), que ya han dado características técnicas concretas acerca de los aviones cero emisiones, hasta el momento pueden llevar a 279 pasajeros y volara largas distancias sin necesidad de sacrificar el confort o la velocidad de los mismos [20].

También existen otras compañías más jóvenes que realizan ensayos para prototipos de aviones a Hidrógeno, como es el caso de la empresa norteamericana Zero Avia, que actualmente está realizando pruebas para implementar aviones con hélices propulsadas por celdas de combustible de hidrógeno [21].

En la siguiente imagen se puede observar un modelo 3D de un prototipo de avión de Zero Avia:

Fig. 8. Modelo 3D de un prototipo de avión de Zero Avia [22]

Panamá, al tener uno de los aeropuertos más importantes de la región, puede colocar estaciones de abastecimiento para que todos los viajes de aviones propulsados por hidrógeno que hagan escala en Tocumen se puedan abastecer de combustible eco amigable.

También es una buena estrategia dar incentivos a las aerolíneas que quieran implementar en su flota, aviones en base a hidrógeno, esto sería a mediano-largo plazo.

3) Aprovechamiento de los proyectos de fuentes de energía renovables existentes en el país para la producción de hidrógeno verde:

En Panamá existen diversos proyectos orientados al aprovechamiento de energías renovables, cuyos excedentes pueden utilizarse para la producción de hidrógeno verde. Según el último informe mensual del mercado mayorista de electricidad elaborado por el Centro Nacional de Despachos de ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica S.A); a mayo de 2022, el 89.4% de la energía total del país es producida a base de fuentes renovables, constando un 83.21% de energía hidroeléctrica, un 5.05% de energía solar, y 1.14% de energía eólica [23].

En la Fig. 9. se puede observar un gráfico de los porcentajes de los tipos de generación de energía en nuestro país a mayo del 2022:

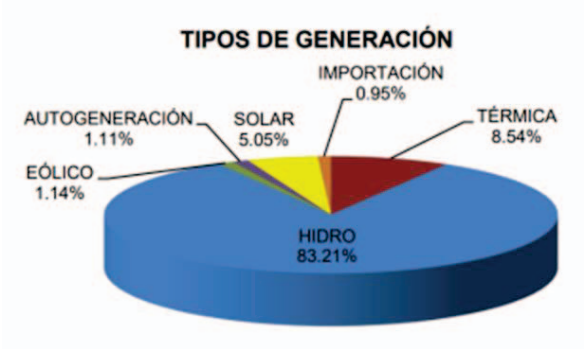


Fig. 9. Gráfico de los tipos de generación de energía en Panamá (mayo 2022) [23].

También, según datos del informe citado anteriormente, a mayo de 2022 existía un excedente de energía producida de 59,912.13 MWh [23].

A continuación se muestra el gráfico de generación de energía vs consumo:

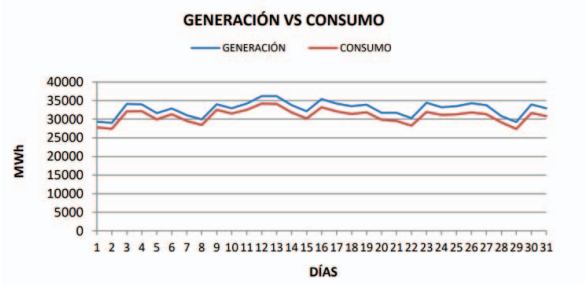


Fig. 10. Gráfico de los tipos de generación de energía en Panamá (mayo 2022) [23].

Como ejemplo, si se multiplica la cifra del mes de mayo de 2022 de 59,912.13 MWh de energía total producida, por el porcentaje de energía que procede de fuentes de energías renovables:

$$59{,}912.13\ MWh * 83.21\% = 49{,}852.88\ MWh \quad (1)$$

En la ecuación 1 se observa que, en teoría, el excedente de energía renovable en el mes de mayo de 2022 en Panamá fue aproximadamente de 49852.88 MWh, lo que equivale a 49852880 KWh.

Según el sitio web Energía Estratégica, Emilio Nieto, quien es director en el Centro Nacional del Hidrógeno de España, para poder producir 1kg de hidrógeno verde mediante electrólisis, se necesitan 57KWh de energía en total, y aproximadamente de 10 a 12 litros de agua [24].

Si dividimos la cantidad de KWh de excedente entre los KWh que se necesitan para producir 1kg de Hidrógeno verde, tendríamos como resultado el potencial de producción en el mes de mayo del año 2022, solo tomando en cuenta la electricidad requerida para el proceso de electrólisis:

$$\frac{49852880\ \text{KWh}}{57\ KWh} * 1kg\ H_2 = 874{,}611.93\ kg\ H_2 \quad (2)$$

Podemos ver que, según la ecuación (2), si solo tomamos en cuenta el excedente de la energía eléctrica calculado de los datos de ETESA, se hubiera podido producir en el mes de mayo del año 2022, 874,611.93 kg de hidrógeno verde.

Igualmente debemos considerar que existen otros factores, como el hecho de que ETESA no es la única empresa distribuidora de energía en Panamá y por ende la capacidad de producción basada en el excedente de energía eléctrica podría ser mayor; y también que cada kg de hidrógeno producido requiere de 10 a 12 litros de agua, por lo que se necesitaría una cantidad considerable de la misma para llevar a cabo el proceso de electrólisis. Además, para realizar este proceso se debe invertir en electrolizadores. Sin embargo, a futuro y con buen manejo de los recursos hídricos, Panamá podría plantearse la producción de hidrógeno verde.

D. ¿Cuánto podría costar producir hidrógeno verde en Panamá?

Los factores que influyen en el costo de la producción del hidrógeno verde son:

- Costo de producción de la energía eléctrica (renovable) que consuma el electrolizador.
- Costo del electrolizador, entre mayor sea su potencia, menor será el precio de $/kWh.
- Costo de operación del electrolizador, a mayor cantidad de horas, más hidrógeno se producirá, por ende, menor precio de venta.

A continuación se muestra en la Tabla III un cuadro de variables, con factores determinantes en la estimación del que sería el costo de producción del hidrógeno verde en Panamá:

TABLA III. OPERACIONAL DE VARIABLES PARA LA ESTIMACIÓN DEL COSTO DE PRODUCIR HIDRÓGENO VERDE EN PANAMÁ:

Estimación del costo de producir hidrógeno verde en Panamá	
Variable	Dimensiones
A	Excedente de energía renovable producida (kWh)
B	Precio promedio por kWh de energía renovable producida ($/kWh)
C	Consumo energético del electrolizador (kWh)
D	Energía producida por el electrizador 90% eficiencia (kWh)
E	Cantidad de energía en kWh necesaria para producir 1 kg de H2 (kg/kWh)

Para el cálculo de estimación del precio de hidrogeno verde producido en Panamá, se despreciará tanto el costo del electrolizador, como el del agua. A falta de fuentes confiables para ser incluidas en estas ecuaciones.

$A = 49\ 852\ 880\ kWh$
$B = 0{,}07535\ \$/kWh$ [25]
$C = 10\ 000\ kWh.$ [26]
$D = 9\ 000\ kWh$
$E = \frac{1\ kg\ H2}{41.4\ kWh}$ [27]

Dividimos el excedente entre el consumo de cada máquina, para determinar a cuantas podemos abastecer:

$$\frac{A}{C} = \frac{49\ 852\ 880\ kWh}{10\ 000\ kWh.} 4\ 985\ Unidades \quad (3)$$

Del excedente necesitaríamos al menos: 49 985 000 kWh para abastecer los electrolizadores.

Luego se multiplican las unidades por la energía producida:

$$\frac{49\ 985\ 000\ kWh * B}{44\ 865\ 000\ kWh * E} = \frac{3\ 766\ 369{,}75\ \$}{1\ 083\ 695{,}65\ kg\ H2} = \mathbf{3.4755}\ \frac{\$}{\boldsymbol{kg}}\boldsymbol{H2} \quad (4)$$

Como se puede observar en la ecuación (4), el costo estimado es bastante competitivo, sin embargo hay muchos factores en juego que no han sido tomados aún en cuenta, y las cifras son preliminares.

CONCLUSIÓN

Una vez terminada la revisión literaria, hemos llegado a la conclusión de que las principales oportunidades de inversión que puede aprovechar Panamá con la producción y distribución de hidrógeno verde pueden generarse aprovechando su posición como Hub Logístico y el Canal Interoceánico.

Esto debe ir de la mano con las políticas energéticas que desarrollen los principales usuarios del Canal de Panamá respecto a este tema. Panamá igual puede aprovechar la oportunidad y cooperar con este desarrollo como vía de tránsito para así atraer inversiones provechosas para el país.

Para poder atraer dichas inversiones, es imprescindible que se cree una demanda interna para el hidrógeno como vector energético en el país, empezando por políticas públicas que favorezcan su uso, como en el caso de Canadá y otros países de la región, donde se están comenzando a implementar en el

transporte público, o se fomenta la compra de vehículos de celdas de combustible de Hidrógeno con incentivos económicos como se hace en Estados Unidos con el Toyota Mirai; y la demanda generada a partir de los medios de transporte puede fomentar la inversión por parte de compañías que fabriquen instalaciones de recarga de hidrógeno para vehículos, conocidas como hidrogeneras.

Además, tampoco podemos olvidar que, al ser Panamá un Hub logístico, puede aprovechar tanto el alto tráfico aéreo como el de los barcos por el canal para incentivar la inversión de compañías de producción y distribución de hidrógeno verde, lo cual sería beneficioso para nuestro país, generando nuevos empleos y ayudando a recuperar nuestra economía.

REFERENCIAS

[1] Gobierno de la República de Panamá. (2022, January 22). Gaceta Oficial No. 29461-A. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29461_A/GacetaNo_29461a_20220124.pdf

[2] Instituto Catalán de Energía. (2022). ¿Que es Y de dónde proviene la energía? [Online]. Available: https://icaen.gencat.cat/es/energia/que_es/

[3] Fundación ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad S.A) de España. (2022). La Energía. Fundación Endesa: iluminamos talento fundacionendesa.org. [Online]. Available: https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-la-energia

[4] BBVA. (2022, January 21). Que son las energías renovables Y POR Que son importantes. BBVA NOTICIAS. [Online]. Available: https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-las-energias-renovables-y-por-que-son-importantes/

[5] K. Mulvaney. (2022, April 5). "Ahora o nunca": Las 4 conclusiones urgentes del informe de la ONU sobre el clima. National Geographic. [Online]. Available: https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/ahora-o-nunca-las-4-conclusiones-urgentes-del-informe-de-la-onu-sobre-el-clima

[6] I. Giménez Zuriaga. (2021, January 1). Economa ARAGONESA revista 73 Hidrogeno Verde 2. Academia.edu - Share research. [Online]. Available: https://www.academia.edu/49936158/ECONOMA_ARAGONESA_revista_73_Hidrogeno_Verde_2?auto=citations&from=cover_page

[7] J. C. Demian Inzulza .(2021). LA PROYECCIÓN NACIONAL HACIA EL ASIA-PACÍFICO EN MATERIA DE HIDRÓGENO VERDE. Cuaderno De Trabajo, (7), 1-31. [Online]. Available: https://www.publicacionesanepe.cl/index.php/cdt/article/view/949

[8] Enel Green Power. (2021, November 8). Hidrógeno Verde Y minas: Una combinación emocionante. Enel Green Power, the platform dedicated to renewables | Enel Green Power. [Online]. Available: https://www.enelgreenpower.com/es/historias/articles/2021/11/hidrogeno-verde-minas

[9] First Mode. (2022, April 25). International mining: Anglo American's newly named nuGen™ hydrogen powered truck set for launch at Mogalakwena mine on May 6. [Online]. Available: https://firstmode.com/resources/international-mining-nugen-hydrogen-powered-truck-set-for-launch-at-mogalakewna-mine-on-may-6/

[10] S. Larrea - E. Echeverría Fernández - W. Ernest Mondol | Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2021, March 16). "Hidrógeno Verde: Oportunidad para liderar la descarbonización de Costa Rica." Energía para el Futuro. [Online]. Available: https://blogs.iadb.org/energia/es/hidrogeno-verde-oportunidad-para-liderar-la-descarbonizacion-de-costa-rica/

[11] Government of Canada | Trade Commissioner Service. (2019, September). CANADA A GLOBAL LEADER IN HYDROGEN AND FUEL CELL BUSES, TRAINS AND HEAVY DUTY VEHICLES. The Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association. [Online]. Available: https://www.chfca.ca/wp-content/uploads/2019/09/GOC-Buses_Train_en_WEB1.pdf

[12] Ballard power. (2022, June). Bus transit - Fuel cell electric buses | Fuel Cell & Clean Energy Solutions | Ballard Power. [Online]. Available: https://www.ballard.com/markets/transit-bus

[13] Toyota U.S.A. (2021, June 1). The All-new Mirai | Owner benefits. New Cars, Trucks, SUVs & Hybrids | Toyota Official Site. [Online]. Available: https://www.toyota.com/content/dam/toyota/brochures/pdf/2021/MY21_Mirai_Owner_Benefits.pdf

[14] Toyota Mirai 2022 fuel cell | El poder de la innovación. (2022). New Cars, Trucks, SUVs & Hybrids | Toyota Official Site. [Online] Available: https://www.toyota.com/espanol/mirai/

[15] Diseñe Su propio Hyundai | Selector de versiones | Hyundai USA. (2022). Hyundai Cars, Sedans, SUVs, Compacts, and Luxury | Hyundai. [Online]. Available: https://www.hyundaiusa.com/us/es/build/trims/#/4563

[16] Hydrogen Europe. (2021, June). HOW HYDROGEN CAN HELP DECARBONISE THE MARITIME SECTOR. [Online]. Available: https://www.hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/How-hydrogen-can-help-decarbonise-the-maritime-sector_final.pdf

[17] Fundación Chile. (2022, April 5). Hidrógeno Verde a partir de agua Y energías renovables. FCh. [Online]. Available: https://fch.cl/iniciativa/hidrogeno-verde/

[18] HyShip. (2022). About HyShip. hyship.eu. [Online]. Available: https://hyship.eu/about/

[19] M. Rebolledo. (2021, October 7). "Panamá Como hub de hidrógeno Verde Y el papel del canal." ("Panamá como hub de hidrógeno verde y el papel del Canal") El Faro | Canal de Panamá. [Online]. Available: https://elfarodelcanal.com/panama-como-hub-de-hidrogeno-verde-y-el-papel-del-canal/

[20] J. C. López. (2021, December 7). Que nos promete el avion comercial propulsado POR hidrógeno: Cuál sera Su autonomía, cuándo llegará Y Que retos conlleva. Xataka - Tecnología y gadgets, móviles, informática, electrónica. [Online]. Available: https://www.xataka.com/investigacion/que-nos-promete-avion-comercial-propulsado-hidrogeno-cual-sera-su-autonomia-cuando-llegara-que-retos-conlleva

[21] T. Gibson and R. Schillinger | Bloomberg. (2022, March 16). Bloomberg. Bloomberg.com. [Online]. Available: https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-03-16/hydrogen-may-be-a-jet-fuel-of-the-future-but-there-are-some-hurdles#xj4y7vzkg

[22] Zeroavia. (2022). ZeroAvia. [Online]. Available: https://www.zeroavia.com/

[23] Centro Nacional de Despacho | ETESA. (2022, June 17). INFORME MENSUAL DEL MERCADO MAYORISTA DE ELECTRICIDAD | MAYO 2022. Centro Nacional de Despacho - ETESA. [Online]. Available: https://sitioprivado.cnd.com.pa/Informe/Download/1094966?key=VXd9e23Z9JRA5aIUR21R-P8gocoGOMqdvSo79FduN

[24] Energía Estratégica. (2021, May 6). "AES se enfoca en Hidrógeno Verde Y comparte información: ¿Cuánta energía genera la tecnología actual?" ("AES se enfoca en Hidrógeno verde y comparte ... - Energía Estratégica") Energía Estratégica | Portal de noticias especializado de energías renovables con información propia y actualización permanente de Latinoamérica. [Online]. Available: https://www.energiaestrategica.com/aes-se-enfoca-en-hidrogeno-verde-y-comparte-informacion-cuanta-energia-genera-la-tecnologia-actual/

[25] ENSA. (2022, July 11). Autoconsumos Fuentes Renovables Y Limpias. [Online]. Available: https://www.ensa.com.pa/autoconsumos-fuentes-renovables-y-limpias

[26] Plug. (2022, July 19). How a PEM electrolyzer is more cost-effective than an alkaline electrolyzer - Plug. Plug Power. [Online]. Available: https://www.plugpower.com/between-two-stacks-how-a-pem-electrolyzer-is-more-cost-effective-than-an-alkaline-electrolyzer/

[27] Lichner, C. (2020, March 26). Electrolyzer overview: Lowering the cost of hydrogen and distributing its production. pv magazine USA. [Online]. Available: https://pv-magazine-usa.com/2020/03/26/electrolyzer-overview-lowering-the-cost-of-hydrogen-and-distributing-its-productionhydrogen-industry-overview-lowering-the-cost-and-distributing-production/

Educational semi-passive biped walking system

Caminante bípedo semi-pasivo para educación

Carlos F. Rodriguez
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
crodrigu@uniandes.edu.co

***Abstract*— The study of biped walking robots present various challenges because of the complexity of the dynamics of their motion and for the access to experimental work since most walking robots are expensive. This article presents the development of an actuated biped passive walking system adequate to support the learning of basic concepts of walking robots. The development progressively includes dynamical models with rising complexity adequate for testing in an easy to built physical prototype. The system initiates with a simple passive walking device which progresses with the addition of an actuator to excite its natural motion. The analysis of this mode of actuation is presented and a controller to maintain the gait given irregularities in the ground is proposed. As a last phase, the design of a knee mechanism with a blocking system is described. The system has been used for modelling and simulation of gait dynamics, state estimation and control of gait frequency.**

Keywords— passive walking device, entrainment control for walking, under-actuated biped robot.

***Resumen* —El estudio de la caminata de robots bípedos presenta diversos retos, tanto por la complejidad de la dinámica del movimiento como por la posibilidad de experimentación debido a los costos de este tipo de sistemas. En este artículo se presenta el desarrollo de un caminante pasivo actuado que puede ser utilizado como apoyo educativo en el tema de robots caminantes. El desarrollo incluye paulatinamente modelos dinámicos de diversa complejidad que pueden simularse y probarse sobre un prototipo físico de construcción sencilla. El sistema inicia con un caminante pasivo que evoluciona con la adición de un actuador que excita su movimiento natural. Se presenta el análisis de este modo de actuación y se propone un controlador que permite recuperar la marcha ante irregularidades del suelo. Como última fase se describe el diseño de rodillas pasivas con bloqueo. El sistema ha sido utilizado para modelado y simulación de dinámica de la caminata, estimación de estado y control de la frecuencia de caminado.**

Palabras claves —caminante pasivo, control de caminata por arrastre. robot bípedo sub-actuado.

I. INTRODUCCIÓN

Los robots caminantes están tomando cada vez mayor auge en nuestra sociedad. Pasaron de ser una curiosidad académica a productos que empiezan a entrar en el mercado. En este proceso se han venido desarrollando una serie de caminantes pasivo o semiautónomos con carácter educativo. Estos son sistemas de construcción económica que permiten explorar estructuras diversas de las piernas, modos de caminata, estrategias de control, entre otros.

El desarrollo de robots con múltiples piernas involucra al menos dos decisiones: el número de piernas y la configuración de cada pierna. Múltiples desarrollos han utilizado modelos de piernas similares a las de los animales (a las humanas o), motivados por la optimización que ha hecho la naturaleza a través de la evolución. Sin embargo, utilizan actuadores bastante diferentes a los músculos, de tal forma que pierden parcialmente la ventaja de copiar a la naturaleza.

El reto de selección de actuadores, su ubicación y control es quizás de mayor importancia que la forma misma de las piernas. El uso de actuadores con baja densidad de energía y el requerimiento de transmisiones pesadas, limita las posibilidades de control y las prestaciones mismas del robot en su caminata.

En contraste, es notoria la baja atención que prestamos al caminar. Podemos asimilar la caminata a una acción repetitiva, con bajo uso de energía y un esfuerzo de control muy moderado. Claro está, que estas condiciones cambian cuando el terreno es complejo y especialmente cuando se presentan tropiezos al caminar. En estos casos, activa gran parte de la energía, la percepción y el control en mantener el equilibrio y recuperar la caminata normal.

En este artículo se presentan tanto el análisis dinámico como la realización física de un caminante semi-activo de dos piernas no actuadas. Este caminante es de fácil construcción por lo que se propone como plataforma educativa para el estudio de dinámicas de caminado. La estructura tiene equilibrio estático y se desarrolló originalmente como un sistema pasivo con dos piernas rígidas que fue evolucionando hacia un caminante semi-activo de piernas con rodillas. El artículo inicia con la exposición de un caminante pasivo planar, basado en la alternancia de movimientos pendulares. En el apartado 3, se presenta el modelo cinemático tridimensional del caminante y se describe la problemática del modelado del contacto entre los pies y el suelo, así como la posible inclusión de rodillas, Posteriormente se presenta una alternativa de actuación que excita la dinámica natural del caminante y permite controlar su

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00106

avance, cambiar de dirección e incluso acomodarse a diversos materiales del piso. El apartado 5 describe diversos detalles constructivos con las referencias adecuadas para guiar a aquellos interesados en construirlo y experimentar con él.

II. Modelos Preliminares

A. Caminata en el Plano

El modelo más sencillo de caminata pasiva en un plano fue propuesto en [1] y ha inspirado un gran número de desarrollos de aparatos caminantes pasivos. Entre ellos, una gran parte corresponde a caminantes estáticamente estables [2], [3].

El caminador pasivo tipo compás es el primer tipo de modelo pendular. Su funcionamiento requiere del uso de energía potencial, de tal forma que se dispone sobre un plano inclinado. En una versión simple se pueden considerar piernas rígidas unidas mediante una unión rotacional a manera de cadera. Cada pierna tendrá un pie semicircular (Fig 1).

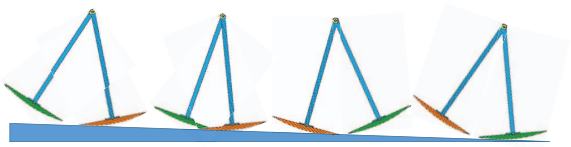


Fig. 1. Modelo de caminata plana tipo compás.

En la secuencia de caminado una pierna se apoya en el plano y el cuerpo avanza moviéndose como un péndulo invertido. La otra pierna se balancea como un péndulo simple hasta que toma contacto con el plano y se convierte en la pierna de apoyo.

Este movimiento haría que el extremo libre de la pierna (el pie) choque con el plano. Por esto se requiere añadir componentes adicionales al modelo. Estos pueden ser un balanceo en el plano perpendicular al avance o articulaciones a manera de rodilla o de tobillo.

B. Modelos Planares Perpendiculares Acoplados

Esta alternativa es una extensión del modelo de compás acoplándole el movimiento del caminante en el plano frontal. De esta forma, en el plano de avance se mantiene el modelo de caminata en el plano descrito en el apartado anterior, mientras que en el plano frontal se usa un modelo de balanceo lateral. El acoplamiento permite eliminar el problema de colisión ente los pies y el piso cuando el robot avanza. En este caso, es usual que se utilice un cuerpo rígido a manera de pelvis y que la unión de la cadera sea una rotación simple (Fig. 2).

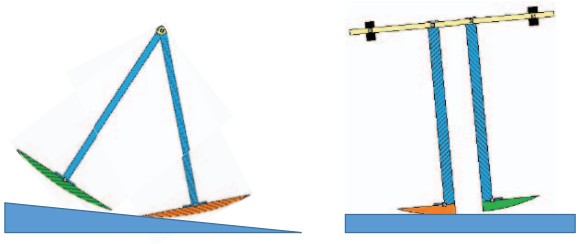


Fig. 2. Modelo de caminata de planos perpendiculares acoplados.

El movimiento en el plano frontal nuevamente es una oscilación pendular, que levanta el centro de rotación de una de las piernas cuando esta se mueve hacia adelante. El ajuste de parámetros para lograr sincronización de estos dos modelos ha sido estudiado en [4]. Una vez más, se utilizan pies semi-esféricos de tal forma que se modela fácilmente el movimiento del centro de rotación del robot en cada plano.

A partir de este tipo de modelos se han planteado diversos tipos de actuación, para poder producir la caminata controlada en superficies planas: se han estudiado prototipos actuando los tobillos, las piernas o cambiando el momentum angular de la pelvis [5], [6], [7], [8], [9].

En muchas propuestas se utilizan menos actuadores que grados de libertad, de tal forma que los robots resultantes son sub-actuados. Este hecho es fundamental, aunque aparentemente reduce la capacidad de control de la caminata, ofrece ventajas en el peso del sistema, y los requerimientos de control. Sin embargo, para un análisis completo es preferible desarrollar modelos tridimensionales como se ilustra en el siguiente apartado.

III. Modelo Tridimensional de Caminata

Los modelos más completos de la caminata son tridimensionales y su planteamiento se realiza por métodos tradicionales de dinámica multicuerpo tales como Newton-Euler, Lagrange-Euler o usando ecuaciones de Kane [10]. Como alternativa pueden utilizarse simuladores de dinámica multi-cuerpo disponibles en el mercado que internamente utilizan alguno de estos paradigmas de modelado.

El modelo resultante tendrá complejidad creciente con el número de grados de libertad. En este trabajo se presenta inicialmente el modelo de caminante con piernas rígidas y posteriormente la evolución en caso del caminante con rodillas no actuadas.

A. Modelo con Piernas Rígidas

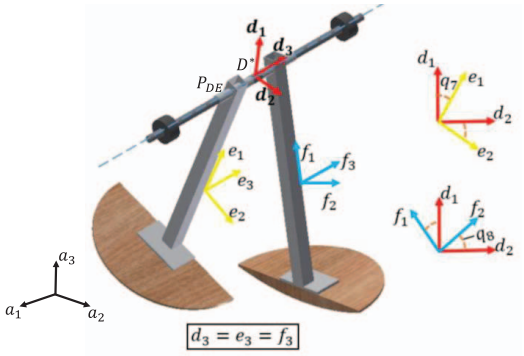


Fig. 3. Definición de sistemas de coordenadas del modelo de caminante.

La Fig. 3 muestra el bípedo ubicado sobre un plano definido respecto al sistema global ($\underline{a}_1$, $\underline{a}_2$, $\underline{a}_3$). La pose de la cadera del robot (cuerpo D) se especifica a través de 6 coordenadas generalizadas $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$. El centro de masa de la cadera D^*estará ubicado en:

$$r^{D^*/O} = q_1\underline{a}_1 + q_2\underline{a}_2 + q_3\underline{a}_3 \quad (1)$$

mientras que la orientación relaciona los vectores fijos en D con los vectores fijos en A, a través de las coordenadas q_4, q_5 y q_6. La orientación puede especificarse mediante alguna representación usual y en este caso se utilizan los ángulos de Euler asociados con las rotaciones sucesivas en la secuencia $XY'Z''$ ($C_i = \cos(q_i)$ y $S_i = \sin(q_i)$):

$$^AR^D = \begin{bmatrix} C_5C_6 & -C_5S_6 & S_5 \\ C_4S_6 + S_4S_5C_6 & C_4S_6 - S_4S_5S_6 & -S_4C_5 \\ S_4S_6 - C_4S_5C_6 & S_4C_6 + C_4S_5S_6 & C_4C_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Por último, las coordenadas q_7 y q_8 permiten ubicar los sistemas de coordenadas fijos a las piernas. Aprovechando que las rotaciones q_6 , q_7 y q_8 se realizan con respecto a ejes paralelos las matrices de rotación son análogas a la ecuación (2), así ($C_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ y $S_{ij} = \sin(q_i + q_j)$):

$$^AR^E = \begin{bmatrix} C_5C_{67} & -C_5S_{67} & S_5 \\ C_4S_{67} + S_4S_5C_{67} & C_4S_{67} - S_4S_5S_{67} & -S_4C_5 \\ S_4S_{67} - C_4S_5C_{67} & S_4C_{67} + C_4S_5S_{67} & C_4C_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$^AR^F = \begin{bmatrix} C_5C_{68} & -C_5S_{68} & S_5 \\ C_4S_{68} + S_4S_5C_{68} & C_4S_{68} - S_4S_5S_{68} & -S_4C_5 \\ S_4S_{68} - C_4S_5C_{68} & S_4C_{68} + C_4S_5S_{68} & C_4C_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

La ubicación de los centros de masa de las piernas y los puntos de contacto entre los pies y el piso, se puede obtener a partir de la información geométrica del caminador.

B. *Cinemática de Movimiento*

Una vez definidos los sistemas de coordenadas y las coordenadas generalizadas del sistema, se procede con el planteamiento cinemático. Para ello el término clave es la velocidad angular de la cadera con respecto al sistema global:

$$\begin{aligned} ^A\underline{\omega}^D = {} & (\dot{q}_4 \\ & + \dot{q}_6S_5)\underline{a}_1 \\ & + (\dot{q}_5C_4 \\ & - \dot{q}_6S_4C_5)\underline{a}_2 \\ & + (\dot{q}_5S_4 \\ & + \dot{q}_6C_4C_5)\underline{a}_3 \end{aligned} \quad (5)$$

Las velocidades angulares de las piernas se pueden obtener de forma simple como:

$$^A\underline{\omega}^E = {}^A\underline{\omega}^D + \dot{q}_7\underline{d}_3 \quad (6)$$

$$^A\underline{\omega}^F = {}^A\underline{\omega}^D + \dot{q}_8\underline{d}_3 \quad (7)$$

El análisis se divide en dos fases. La fase de apoyo simple y la de apoyo doble. Durante el apoyo simple el sistema se comporta como una cadena cinemática abierta. Se inicia por el pie en contacto con el suelo que se puede tratar como un contacto sin deslizamiento (rodadura). Aplicando las ecuaciones de velocidad nula en el punto de contacto ($\hat{E}$ o $\hat{F}$ según sea el caso), se puede resolver la progresión del pie sobre el suelo. Por ejemplo, si el pie en contacto es el E se tiene que:

$$\begin{aligned} & ^A\underline{v}^{\hat{E}} \\ & = {}^A\underline{v}^{D^*} \\ & + {}^A\underline{\omega}^D \\ & \times {}^{D^*}\underline{r}^{P_{DE}} \\ & + {}^A\underline{\omega}^E \\ & \times {}^{P_{DE}}\underline{r}^{\hat{E}} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Esta ecuación permite resolver el movimiento de la pierna apoyada siendo P_{DE} el punto de unión entre la cadera y la pierna. Aprovechando que las uniones son rotaciones simples, se pueden resolver los movimientos de la cadera y de la pierna no apoyada.

La fase de doble apoyo se inicia cuando el pie en vuelo hace contacto con el piso y finaliza cuando el pie que originalmente estaba apoyado se despega del suelo. Durante esta fase el movimiento corresponde a una cadena cinemática cerrada con dos apoyos de contacto.

Sin embargo, si los pies semi-esféricos se construyen con la geometría adecuada, este movimiento se simplifica y puede modelarse como la oscilación de un péndulo invertido en tres dimensiones. De hecho, la transición del contacto de un pie, puede analizarse como un impacto de duración infinitesimal. Este aspecto se amplía en el siguiente apartado.

C. *Modelado del Contacto Pie-Suelo*

Un aspecto fundamental en este desarrollo es el manejo del contacto entre los pies y el suelo. Es usual que el caminante se modele usando componentes rígidos. En consecuencia, el contacto con el piso debe considerar la transición entre el instante antes de entrar en contacto y el instante posterior al contacto. Formalmente esta transición se puede modelar como un impacto inelástico, pues se espera no se produzca rebote, sino que el movimiento posterior al contacto continúe como un contacto sin deslizamiento.

Sin embargo, para la simulación computacional se prefiere modelar el piso como un sistema elástico con disipación, lo cual permite cierta penetración del pie en el suelo (X_{pen}), disminuyendo los requerimientos de tiempo de muestreo y mejorando la estabilidad de la solución: se disminuye el efecto de la discontinuidad del impacto [11].

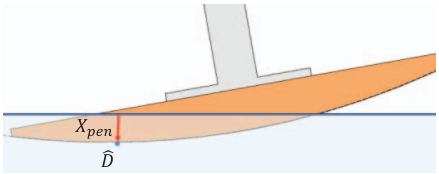


Fig. 4. Penetración del punto de contacto del pie en el suelo.

En la Fig. 4, se ilustra el efecto de penetración del pie en el suelo que produce una fuerza normal (F_N). Esta fuerza se modela como función de la distancia de penetración (X_{pen}) y de la velocidad de la penetración (V_{pen}), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_N = \begin{cases} kX_{pen} + cV_{pen} & ; X_{pen} > 0, V_{pen} > 0 \\ kX_{pen} & ; X_{pen} > 0, V_{pen} < 0 \\ 0 & ; X_{pen} \leq 0, \end{cases} \quad (9)$$

En [12] se presenta una metodología de estimación de las propiedades del contacto (constante de elasticidad k y constante de disipación c) para el caminador bípedo presentado en este artículo. En el trabajo se analizó el comportamiento de los pies semiesféricos en contacto con suelo rígido. Los valores obtenidos tienen una validez limitada pues determinan las propiedades de elasticidad y disipación para un tipo de suelo específico. Aunque estos valores son útiles para realizar las simulaciones, en un prototipo real este aspecto se considera como una perturbación que debe manejar el controlador del sistema.

D. Piernas con Rodillas no Actuadas

El robot caminante con piernas rígidas requiere que la oscilación en el plano frontal sea bastante pronunciada para que el pie en fase de vuelo pueda avanzar sin chocar con el suelo. Este efecto puede disminuirse si se adicionan articulaciones tipo rodilla que actúen adecuadamente durante la fase de vuelo.

A continuación, se propone una modificación del modelo propuesto previamente para incluir un mecanismo de rodilla con bloqueo. Cada pierna se divide en dos segmentos con una unión rotacional simple que permite la rotación en plano de avance. El movimiento oscilatorio corresponde a un péndulo doble que se bloqueará cuando los dos segmentos queden alineados (Fig. 5)

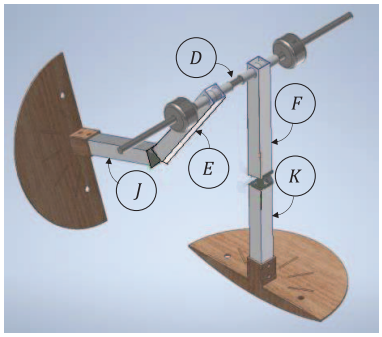


Fig. 5. Modelo de robot caminante con rodillas.

La modificación del modelo cinemático es bastante sencilla, pues en cada pierna se añade un movimiento de rotación cuyo eje es paralelo a la rotación de la pierna con la cadera. De esta forma se consideran dos coordenadas generalizadas adicionales (q_9 y q_{10}) y sistemas de coordenadas fijos en los segmentos inferiores de la pierna (pantorrilla). Las matrices de rotación de los marcos J y K son una extensión sencilla de las ecuaciones (3) y (4) y las velocidades angulares con respecto al sistema global son una extensión natural de las ecuaciones (6) y (7).

IV. Actuación y Control

Como se mencionó previamente, la actuación de un robot caminante puede realizarse con diversos niveles de complejidad. En este trabajo se presenta uno de los métodos de actuación más simples, inspirado en la excitación de movimiento natural del sistema. Para ello se aprovecha que el sistema estudiado tiene estabilidad estática (se mantiene de pie cuando está quieto) y fue desarrollado originalmente como un caminante pasivo (camina por un plano inclinado si se inicia adecuadamente).

Para ello no se actuarán directamente las uniones articuladas, sino que se añadirá un sistema de masa oscilatoria que impulse el momentum angular lateral y frontal del caminante.

A. Actuador Propuesto

El actuador consiste en un sistema de masa oscilatoria solidario con la cadera del caminante (Fig. 6). Antes de iniciar el movimiento, el actuador desplaza el centro de masa del sistema hacia adelante, lo cual promoverá la caminata en superficies horizontales [13]. Cuando la masa está oscilando, se debe buscar que excite adecuadamente el balanceo lateral natural del caminante. Este fenómeno se conoce como *arrastre* o *entrainment* [14] y permitirá que el robot avance caminando en línea recta.

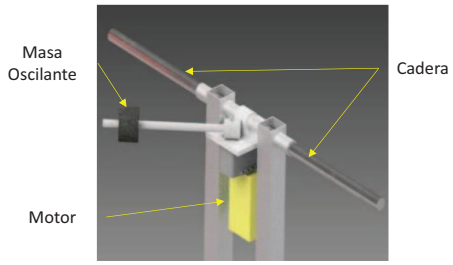


Fig. 6. Mecanismo de actuación del robot

El *arrastre* se logra ajustando la frecuencia de la oscilación del actuador, cuya onda debe estar desfasada de la oscilación lateral del caminante. En la figura 7, se ilustra el desfase que produce arrase en el caminador de piernas rígidas descrito en el apartado anterior.

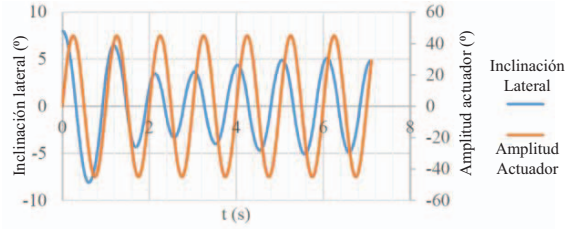


Fig. 7. Relación entre actuación y movimiento para lograr el arrastre

El avance de los pies se logra gracias a la distribución de masa de las piernas que hacen una oscilación sincronizada con la elevación lateral de la cadera. Para que el movimiento resultante sea una caminata se debe ajustar también desfase hacia adelante del centro de masa del sistema. La longitud de zancada del caminante, puede también ajustarse modificando la amplitud de la oscilación. En la figura 8, se ilustra el resultado de aplicar diversas amplitudes y frecuencias de excitación al caminante de piernas rígidas. La selección de los parámetros adecuados permite lograr una caminata estable excitando la dinámica natural del caminante.

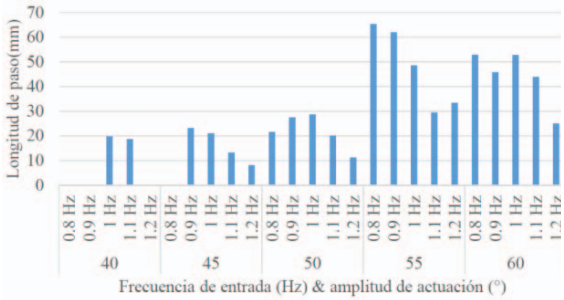


Fig. 8. Longitud del paso para diversas actuaciones.

B. *Control de Arrastre*

Para que el sistema opere de forma adecuada en diversas condiciones de contacto entre el suelo y los pies, se implantó un sistema de control que mantenga el desfase entre la oscilación lateral de la cadera y la oscilación de actuación. Para ello se requiere seleccionar la amplitud (A_n) y frecuencia (f_n) nominal de actuación de la Fig. 8 que se convertirán en los parámetros deseados. Midiendo el movimiento oscilatorio de la cadera y realimentándolo a un sistema de control de fase de ganancia variable, se logra adaptar la caminata ante perturbaciones asociadas con pequeñas variaciones del terreno o cambios en las propiedades de la superficie. En la Figura 9 se ilustra el esquema de control de ganancia variable implantado para ajustar la fase de la actuación.

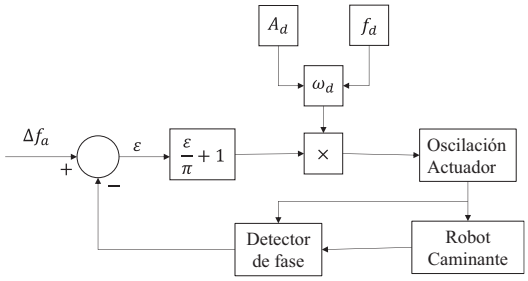


Fig. 9. Esquema de control de fase de ganacia variable.

Para validar la capacidad del control de ganancia variable de la fase para adaptar la caminata ante perturbaciones se realizó un experimento de caminata en suelo plano con una ranura perpendicular a la dirección de avance.

En la figura 10 se presentan los resultados comparativos del comportamiento con actuación sin control y con el controlador propuesto. En la figura de la izquierda se observa que la perturbación produce prácticamente el detenimiento de la caminata, pues reduce notablemente la amplitud de la oscilación natural y el caminador no puede recuperar la cadencia original. Mientras tanto, en la figura de la derecha, se observa que el caminador recupera la cadencia de la caminata después de unos pocos segundos.

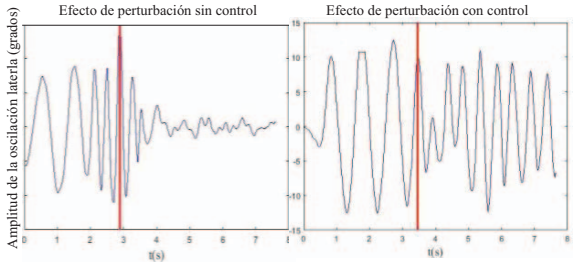


Fig. 11. Efecto del controlador de fase.

C. *Arranque y Frenado*

Las maniobras de arranque y frenado del caminante deben comandarse de manera especial: Para el arranque se realiza una excitación semi-aleatoria que permita desestabilizar el sistema lateralmente. Una vez las caderas oscilen lateralmente, se habilita el controlador de caminata que ajustará el movimiento del actuador para lograr la caminata estable.

La maniobra de frenado consiste en desfasar el movimiento del actuador de tal forma que se oponga al movimiento natural de oscilación lateral del caminador: una especie de anti-*arrastre* produciendo que el caminante se detenga.

D. *Control de Dirección*

El sistema de actuación propuesto, también permite comandar cambios de dirección de la caminante siguiendo arcos de círculo. Para lograrlo se hace un corrimiento del centro de la oscilación en la dirección en la que se desee realizar el cambio de dirección (Fig. 11).

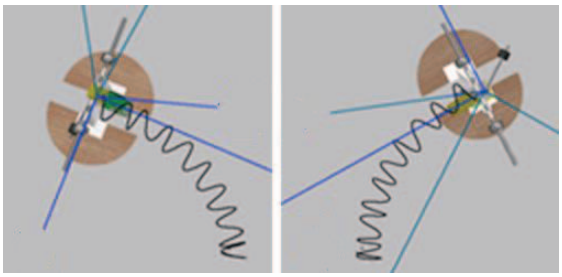


Fig. 12. Control de dirección de avance del caminante.

V. Construccion del Prototipo

En el diseño del prototipo se ha mantenido el principio de su carácter educativo. Esto implica la facilidad de los materiales, procesos de manufactura y de ensamble, y la selección de instrumentos y tarjetas electrónicas de uso común. Además, se han considerado variantes para que los interesados puedan adaptar la construcción a sus recursos.

A. *Caminador Pasivo*

El sistema básico de caminante pasivo con piernas rígidas consta de una cadera y dos piernas con pies semiesféricos. La cadera es esencialmente una varilla de acero, cuya longitud puede variarse si se añaden contrapesos. Para las piernas se sugiere un perfil cuadrado de aluminio que se une a la cadera usando bujes hechos a partir de tubos plásticos (PVC). Para los

pies se recomienda usar MDF cortado con láser, aunque puede usarse otra madera y otros métodos para darle forma. Algunos detalles constructivos se ilustran en la Fig. 12 y pueden consultarse en [15], [16], [17].

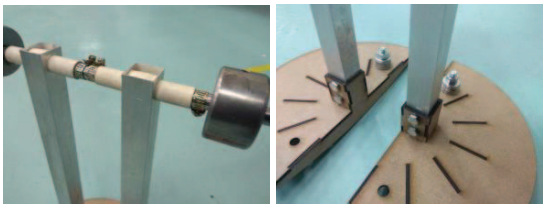


Fig. 13. Detalles de la construcción del prototipo.

B. *Sistema de Actuación*

El sistema de actuación se ha construido con una varilla y un cilindro de acero movidos por un motor Dynamixel AX-12A. El movimiento puede controlarse con una tarjeta Arduino o una Raspberry Pi. A esta tarjeta se conectan también los sensores de movimiento y pueden conectarse otros accesorios como por ejemplo un control remoto para facilitar las pruebas. La electrónica de control y la batería, se han dispuesto en una caja que se cuelga de la cadera (Fig. 13).

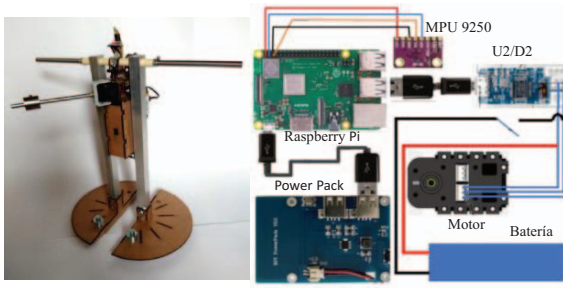


Fig. 14. Prototipo y esquema del sistema de actuación y control.

C. *Diseño de Rodillas Pasivas*

Como modificación del prototipo se presenta el diseño de un mecanismo de rodillas pasivas que permite el bloqueo cuando se alinea la pierna. De esta forma se puede mantener la estabilidad del robot cunado está quieto y se genera el comportamiento de péndulo doble que se expuso previamente para favorecer que el pie avance sin chocar con el suelo durante la fase de vuelo. En todo caso, se requiere que el bípedo se incline lateralmente mientras camina.

El mecanismo se basa en el uso de un electroimán y un resorte dispuestos en una articulación rotacional como se ilustra en la Fig. 14. La función del electroimán será bloquear la rodilla durante el apoyo simple, mientras que el resorte facilitará el inicio del movimiento de la articulación para que la pierna se comporte como un péndulo doble.

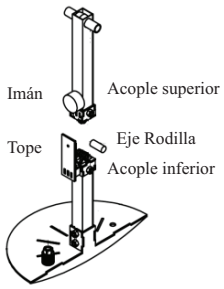


Fig. 15. Mecanismo de rodilla con bloqueo

Para lograr el movimiento adecuado de las dos secciones de la pierna, se requiere estudiar adecuadamente la distribución de la masa y ajustarlo en conjunto con la fricción presente en la rodilla. Este aspecto aún se encuentra en desarrollo en este proyecto.

Durante la evolución del caminante, se han mantenido materiales y procesos de manufactura económicos en el diseño. El caminante con rodillas está en etapa de implantación, pero pueden verse algunos videos de simulaciones dinámicas de su operación [18].

VI. Conclusion

Se ha presentado el desarrollo de un robot caminante sub-actuado de alcance académico. El desarrollo tiene un énfasis especial en la facilidad de su construcción y ofrece alternativas progresivas de desarrollo desde un caminante pasivo hasta un robot con rodillas pasivas.

Este modelo ha permitido estudiar diversos aspectos de la caminata de robots bípedos: el modelado dinámico para simulación y diseño, la actuación por excitación de su dinámica natural, el control de fase para el manejo de perturbaciones del suelo y el control de dirección.

Tanto los desarrollos ilustrados en este artículo, como otros en los que se ha estudiado con mayor profundidad la adaptación de la caminata a diversas superficies y la estimación de estado, validan el desarrollo propuesto como plataforma educativa valiosa, por su facilidad de modelado y construcción, y por su bajo costo.

Seguramente se ampliará la variedad y profundidad de las oportunidades educativas que ofrece en la medida que se amplíe su utilización. Como ideas de trabajo futuro, se podrán explorar nuevos algoritmos de estimación y control, así como algoritmos de aprendizaje de modos de caminata y actuaciones como robot individual.

Referencias

[1] T. McGeer, «Passive Dynamic Walking,» The International Journal of Robotics Research, pp. 62-82, 1990.

[2] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake y M. Wisse, «Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers,» Science, pp. 1082-1085, 2005.

[3] N. Rokbani, A. Zaidi y A. M. Alimi, «Prototyping a biped robot using an educational robotics kit,» de International Conference on Education and e-Learning Innovations, 2012.

[4] J. D. Vivas, «Desarrollo de un Sistema Robótico Subactuado,» Universidad de los Andes, Bogotá, 2017.

[5] C. Chevallereau y Y. Aoustin, «Self-stabilization of 3D walking via vertical,» de IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.

[6] P. X. M. La Hera, , A. S. Shiriaev, L. B. Freidovich, U. Mettin y S. V. Gusev, «Stable Walking Gaits for a Three-Link Planar Biped Robot With One Actuator,» IEEE Transactions on Robotics, pp. 589-601, 2013.

[7] R. Tedrake, T. W. Zhang, M. F. M. Fong y H. S. Seung, «Actuating a simple 3D passive dynamic walker,» de IEEE International Confernce on Robotics and Automation, 2004.

[8] Y. Hu , G. Yan y . Z. Lin, «Gait generation and control for biped robots with underactuation degree one,» Automatica,, p. 1605–1616, 2011.

[9] C. Tang, G. Yan, Z. Lin, Z. Wang y Y. Yi, «Stable walking of 3D compass-like biped robot with underactuated ankles using discrete transverse linearization,» Transactions of the Institute of Measurement and Control , p. 1074–1083, 2014.

[10] C. F. Rodriguez, Dinámica Mecánica, Bogotá: Ediciones Uniandes, 2021.

[11] G. Gilardi y I. Sharf, «Literature survey of contact dynamics modelling,» Mechanism and Machine Theory, p. 1213–1239, 2002.

[12] D. J. Marin, «Modelamiento dinámico en 2D y diseño de observador para un caminador bípedo pasivo,» Universadad de los Andes, Bogota, 2017.

[13] C. F. Rodriguez, J. C. Martinez y S. Murillo, «Stable Walking Dynamics in a Semi-Passive Biped,» de The 21st International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Panama, 2018.

[14] D. Hobbelen y M. Wise, «Limit cycle walking.,» de Humanoid Robots, Human-like Machines, Rijeka, InTech, 2007, pp. 277-294.

[15] J. C. Martinez, «Stable Walking Dynamics in a Semipassive biped,» Universidad de los Andes, Bogota, 2018.

[16] S. Murillo, «Robot caminador bipedo semi-pasivo como plataforma educativa de bajo costo,» Universidad de los Andes, Bogota, 2019.

[17] J. M. Arenas, «Construcción e Implementación de un Sistema de Control para un Caminador Bípedo Semipasivo,» Universidad de los Andes, Bogota, 2019.

[18] M. D. Galvan, «Análisis Dinámico de Robot Caminador Semipasivo con Modelo de Doble Péndulo,» Universidad de los Andes, Bogota, 2020.

Long-term monitoring of moisture changes in invasive time lapse ERT methodology

2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)

Monitoreo a largo plazo de los cambios de humedad en suelos sedimentarios de Panamá a través de la metodología no invasiva de lapso temporal de TRE

Alexis Mojica
LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Sistema Nacional de Investigación, SENACYT
Panamá
https://orcid.org/0000-0002-9069-7336

Anibal Fossatti
Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica CITT, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
https://orcid.org/0000-0003-4284-3500

Pablo Montero
Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica CITT, Universidad Tecnológica de Panamá
Panama
https://orcid.org/0000-0002-1471-2741

Leomar Acosta
Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
leomar.acosta@gmail.com

Margie Gómez
LABEST, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
margie.gomez@utp.ac.pa

Carlos A. Ho
LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
carlos.ho@utp.ac.pa

Cristóbal Condori
Departamento Académico de Geología y Geofísica de la Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa
Perú
https://orcid.org/0000-0003-2657-147X

Ramsés Buenaño
Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
ramses.buenano@utp.ac.pa

Rosalín Méndez
LIICA, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
rosalin.mendez@utp.ac.pa

Osiris Cubilla
3P Soc. Ltda.
Panamá
osiris.cubilla.1986@gmail.com

Eduardo Silva
3P Soc. Ltda.
Panamá
silvasan@cwpanama.net

***Abstract*— The aim of this work was study the effects of climate and vegetation on the moisture content present in soils that support a complex vegetation system which comprises a pasture and micro-forest area, at the Center for Innovation and Technology Transfer of the Technological University of Panama located in Aguadulce, Coclé. For such purposes, a geophysical monitoring was carried out through four electrical resistivity tomographies on a 23.5 m long profile developed in the rainy season from July 9 to October 29, 2019 with time lapses of 38, 34 and 39 days between them. The datasets were inverted using a time-lapse ERT code based on the Boundless Electrical Resistivity Tomography (BERT). With the results obtained in this work (electric resistivity tomographies), was possible to delimit the electrical anomalies related to the physical characteristics of the subsoil in both: the pasture and the micro-forest area. Geophysical monitoring and volumetric moisture content calculated via Archie's law, allowed quantifying the dynamics of moisture content in both areas with significant percentage differences between -50% and 100% over the micro-forest area. This leads us to evaluate the levels of moisture absorption in both areas and consider the problem of land use and the impact it has on the groundwater recharge processes in this important region of the country.**

Keywords*— *volumetric moisture content, time-lapse ERT, Aguadulce, pasture zone, micro-forest

I. INTRODUCCIÓN

Las transformaciones que experimentarán los ecosistemas y la fisiología de las plantas en un futuro no muy lejano, serán el resultado de las alteraciones que en la actualidad presentan los patrones de temperatura y precipitación debido al cambio climático; es importante agregar el impacto negativo que esto tendrá en la disponibilidad del agua y la productividad de las plantas, y por ende, en la dinámica de los niveles de humedad en muchas regiones alrededor del mundo y adicionando los diversos factores artificiales como la urbanización, la demanda de energía y la producción de alimentos, los cuales generarán cambios abruptos en la cobertura del suelo [1, 2]. De acuerdo con Seneviratne et al. [3], el nivel de humedad que se encuentra en la zona no saturada constituye la clave que controla los ciclos climáticos, de energía, carbono y el ecosistema. Es importante señalar que la cantidad y distribución del contenido de humedad en el subsuelo también influye otros procesos que son de vital importancia en el balance hidrológico como por ejemplo la actividad

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00107

microbiana, el flujo de nutrientes y la recarga de los acuíferos; por esta razón, la caracterización de las interacciones dinámicas entre la vegetación y la humedad del subsuelo puede jugar un rol importante en el pronóstico de las fuentes hídricas a nivel global y mejorar los modelos de gestión hidrológica tierra → atmósfera.

El problema que se presenta al tratar de caracterizar estas interacciones es la imposibilidad de identificar las trayectorias preferenciales de los flujos subterráneos a una buena resolución bajo condiciones naturales [2]; en diversas investigaciones se reportan el uso de los sensores remotos los cuales proveen información acerca de los contenidos de humedad del subsuelo a escala regional, pero esta metodología no ofrece una buena resolución a nivel espacial ni temporal, aunado al hecho de que posee limitantes en cuanto a la profundidad de investigación; por otro lado, la reflectometría en el dominio temporal y otras metodologías son capaces de ofrecer información puntual de forma muy precisa sobre los contenidos de humedad en el subsuelo y con una notable resolución temporal pero sin la posibilidad de extrapolar a otras escalas.

Ante este panorama, los métodos de prospección geofísica se presentan como una alternativa no invasiva, de bajo costo y optimización del recurso humano reduciendo de esta manera el tiempo en campo. El uso de tomografías repetitivas a lo largo de un mismo perfil constituye una herramienta eficaz a la hora de obtener información sobre la dinámica de los fluidos en el interior de la tierra; por ejemplo, se hace referencia a trabajos que muestran la eficiencia del uso de la misma (imaginería de lapso temporal geoeléctrica 2D) en estudios de trazadores salinos es la geoeléctrica [4, 5, 6, 7] y en estudios estacionales con el fin de cuantificar las variaciones que experimentan los contenidos de humedad en el subsuelo [2, 8, 9, 10, 11, 12].

Este trabajo busca conocer los cambios que experimentan los contenidos de humedad de los suelos en una zona ubicada en la ciudad de Aguadulce, provincia de Coclé a través de un análisis de lapso temporal de tomografía de resistividad eléctrica durante un período comprendido entre julio y octubre de 2019 el cual corresponde a la época de lluvias en el trópico panameño.

II. Area de estudio

A. *Ubicación geográfica y contexto geológico del sitio*

La Figura 1(a) muestra la ubicación geográfica del sitio, la cual presenta coordenadas UTM del punto central: 551454,80 mE y 911537,94 mN.

En base al contexto geológico de la zona y alrededores, el sitio de interés se encuentra caracterizado por la presencia de conglomerados, lutitas, areniscas, areniscas no consolidadas y pómez, propios todos estos elementos de la Formación Río Hato del Período Cuaternario (grupo Aguadulce). La Figura 1(b) presenta un mapa generalizado del área la zona de estudio y sus alrededores.

B. *Vegetación y condiciones climáticas*

En el lado Este de las infraestructuras que albergan el CITT de Aguadulce, se encuentra un micro-bosque cuyo suelo presenta una variada actividad biológica; con el fin de comprender el efecto que causan las lluvias sobre las propiedades eléctricas de los suelos que comprenden (a) dicho micro-bosque y (b) una zona de pastos, se definió un perfil de 23,5 m de longitud en dirección Suroeste-Noreste. La zona de pastos comprende una extensión de 5,5 m aproximadamente a lo largo del perfil, mientras que la zona del micro-bosque, 18 m. La figura 2 ilustra la ubicación de cada zona.

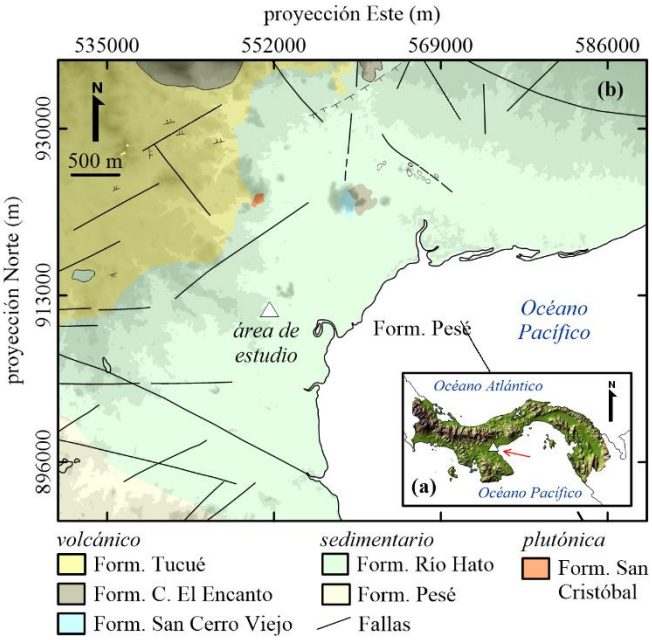


Fig. 1. (a) Ubicación geográfica de la ciudad de Aguadulce, provincia de Coclé y (b) mapa geológico generalizado de la zona de estudio y alrededores.

Fig. 2. Panorámica del área de interés que muestra la zona de pastos y el micro-bosque.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, la zona de estudio se caracteriza por presentar un clima trópico de sabana, con una precipitación anual menor a 2500 mm, con una estación seca prolongada (meses con lluvia menor a 60 mm) en la época de invierno del hemisferio norte; temperatura media del mes más fresco > 18°C, y con una diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y el más fresco <5°C.

La zona donde reposa el distrito de Aguadulce pertenece a la sub-cuenca Río Pocrí, perteneciendo ésta a la cuenca hidrográfica Río Grande el cual cubre una superficie de 2434,04 km^2.

III. Materiales y métodos

A. *Actividad meterológica*

El gráfico de la Figura 3 muestra la actividad meteorológica que se dio lugar en el sitio entre los meses de junio y noviembre de 2019 el cual corresponde al periodo en

donde se desarrollaron las 4 pruebas tomográficas de tipo eléctrica 2D.

- Prueba 1 (9/julio/2019): La actividad pluviométrica registrada los 2 días antes de la prueba registró un total de 21,9 mm y los 3 días anteriores al 7 de julio, no se registraron lluvias. Por su parte, el día de esta primera prueba no se registraron lluvias.

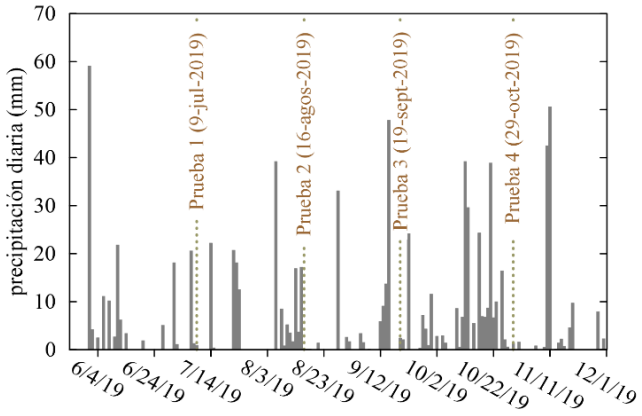


Fig. 3. Gráfico de precipitación diaria entre los meses de junio y noviembre de 2019 con las fechas en que se desarrollaron las 4 jornadas geofísicas.

- Prueba 2 (16/agosto/2019): Desde el 11 hasta el 15 de agosto de 2019 (5 días antes de la prueba), se registraron 43,0 mm de lluvias siendo el 15 de agosto, el día en que se registró el máximo (17,2 mm). El 16 de agosto no se registraron lluvias.
- Prueba 3 (19/septiembre/2019): Los días 14 y 15 de septiembre de 2019 hubo registro de lluvias de 13,7 y 47,8 mm respectivamente obteniéndose un total de 61,5 mm; por otro lado, los 3 siguientes días anteriores a la prueba (16, 17 y 18 de septiembre), no se registró actividad pluviométrica en la zona de interés.
- Prueba 4 (29/octubre/2019): Un total 19,2 mm fue registrado durante los 5 días anteriores a esta cuarta prueba. Los días comprendidos entre el 24 y 27 de octubre de ese año, se registraron valores mínimos y máximos de 0,10 mm y 16,4 mm mientras que el día anterior a la prueba geofísica (28 de octubre), no se registraron lluvias.

B. Mediciones de campo

Cada prueba consistió en la obtención de un conjunto de datos de resistividad eléctrica aparente del subsuelo a partir de un dispositivo Syscal R1 (de IRIS Instruments) interconectado a 48 electrodos separados entre ellos una distancia de 0.5 m.

Una configuración Wenner-Schlumberger fue utilizada en cada una de estas pruebas obteniéndose un total de 529 datos de campo. El tiempo de adquisición se fijó a 500 ms y el número mínimo de inyección de corriente eléctrica se estableció en 3, tomando en cuenta que, si la desviación estándar de estas 3 mediciones superaba el 1%, el dispositivo debía inyectar 3 veces más a fin de garantizar la calidad de la medición en un solo punto.

C. Inversión tomográfica 2D y análisis de lapso temporal

El código de inversión tomográfico 2D utilizado en este trabajo fue el Boundless Electrical Resistivity Tomography – BERT [13, 14]; dicho código se encuentra basado en el método de Gauss-Newton con regularización global. Para el proceso de discretización del subsuelo, el código utiliza la técnica de malla triple la cual se construye en base a los parámetros de entrada. La dimensión de los elementos se incrementa con la profundidad de tal forma que los elementos de mayor dimensión son creados a profundidad o cercano a los límites y tienen extensiones de diversos múltiplos de distancia entre los electrodos. El segundo campo de malla se obtiene a través de un proceso de refinamiento global de los parámetros de dicha malla [13], y con la finalidad de evitar los efectos por las condiciones de frontera, se aplica una prolongación de la malla.

Utilizando la norma l_2 del residual ponderado entre los datos de campo u observaciones (**d**) y la respuesta del modelo **f**(**m**), la funcional $\Im_d$ puede minimizarse, de acuerdo con Günther et al. [14], a través de la siguiente estructura matemática:

$$\Im_d(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{d_i - f_i(\mathbf{m})}{\epsilon_i} \right|^2 = \left\| \mathbf{D}\left(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})\right) \right\|_2^2 \qquad (1)$$

En la ecuación (1) **D** = diagonal($1/\varepsilon_i$) y ε el error de los datos de campo o de las observaciones. El código calcula el cambio en el modelo de resistividad (Δ**m**) a través de un proceso iterativo, es decir:

$$\gamma^k \Delta\mathbf{m}^k = \mathbf{m}^{k+1} - \mathbf{m}^k \qquad (2)$$

En la ecuación (2) γ^k corresponde a un parámetro de búsqueda, y *k* como el número de la iteración. Este cambio en el modelo de resistividad para cada iteración conlleva a la aplicación del esquema de Gauss-Newton para minimizar $\Im$. De acuerdo con Park y Van, [15]:

$$\Delta\mathbf{m}^k = \left(\mathbf{J}^T\mathbf{D}^T\mathbf{D}\mathbf{J} + \lambda\mathbf{C}^T\mathbf{C}\right)^{-1} \left(\mathbf{J}^T\mathbf{D}^T\mathbf{D}\left(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}^k)\right)\right.$$

$$\left. -\lambda\mathbf{C}^T\mathbf{C}\left(\mathbf{m}^k - \mathbf{m}^0\right)\right) \qquad (3)$$

En la ecuación (3) **C** corresponde a una matriz de restricciones, $\mathbf{m}^0$ el modelo de referencia, λ es un parámetro de regularización y **J**, la matriz Jacobiana o de sensibilidad que contiene las derivadas parciales de las respuestas del modelo con respecto a los parámetros del modelo, es decir:

$$\mathbf{J}_{ij}\left(\mathbf{m}^k\right) = \frac{\partial f_i(\mathbf{m}^k)}{\partial m_j}$$

El objetivo primordial del análisis de lapso temporal de tomografía de resistividad eléctrica es el obtener imágenes del subsuelo que reflejen los cambios en los valores de las resistividades calculadas de forma tal que los modelos plausibles que dependen del tiempo se ajusten a las observaciones. De acuerdo con Günther, [16] el proceso de monitoreo geoeléctrico puede llevarse a cabo de diferentes maneras; en este estudio la inversión se realiza invirtiendo los datos de campo de la primera prueba la cual es considerada como la referencia; para las siguientes pruebas se realiza una inversión completa (minimización) pero considerando que los modelos se encuentran restringidos tomando como referencia el modelo obtenido con la inversión de la primera prueba [17].

Posterior a la inversión, el resultado obtenido corresponderá a cada uno de los cuatro modelos 2D de

resistividad eléctrica calculada y a tres modelos de los cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada.

D. Los contenidos volumétricos de humedad - resistividad

Con el objetivo de relacionar el contenido volumétrico de humedad con la resistividad eléctrica del subsuelo, recurrimos a mediciones de laboratorio en donde, de un total de 12 muestras de suelo extraídas del área de estudio (a una profundidad de 20 cm), solo 8 de ellas fueron analizadas debido al estado en que fueron extraídas. Esta metodología ha sido reportada en diversos estudios [12, 18].

Para obtener una relación empírica entre los parámetros mencionados, a cada muestra de suelo se midió el valor de la resistividad eléctrica empleando la norma ASTM D G57-2012, en donde se utilizó un Miller Soil Box con la capacidad de albergar un volumen de 80 cm^3 de suelo; esta caja de plexiglás posee un par de placas metálicas en sus extremos para la conducción de la corriente eléctrica y un par de electrodos de acero inoxidables para la medición del voltaje. La fuente de corriente eléctrica empleada para llevar a cabo las mediciones de resistividad eléctrica de las muestras de suelo fue un LandMapper ERM-02 de Landviser, LLC. Por su parte, para la medición del contenido volumétrico de humedad de dichas muestras, se empleó la norma ASTM D854, en donde las masas de las muestras se registran antes y después del proceso de secado el cual se lleva a cabo a 100°C por 24 horas. Los trabajos de Archie [19] proponen una ecuación empírica que relaciona la resistividad eléctrica de la formación (ρ) con el contenido volumétrico de humedad (θ):

$$\frac{\rho}{\rho_w} = \frac{a}{\theta^m} \tag{4}$$

La ecuación (4) revela la relación potencial decreciente que existe entre ρ y θ; a y m corresponden a constantes empíricas y ρ_w es la resistividad volumétrica de una muestra de suelo completamente saturada.

IV. Resultados y Discusión

A. Contenido volumétrico de humedad vs resistividad eléctrica (ley de Archie)

Los resultados obtenidos en el laboratorio en relación con las ocho muestras analizadas, dio por resultado el gráfico de la Figura 4.

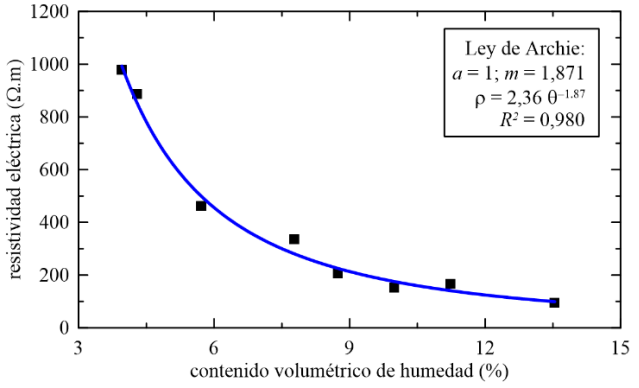


Fig. 4. Relación entre la resistividad eléctrica (ρ) y el contenido volumétrico de humedad (θ) de las 8 muestras de suelo obtenidas en el sitio de trabajo.

B. Pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente medidas

El conjunto de los 2116 datos de campo obtenidos en este trabajo de investigación (como producto de las mediciones realizadas en las cuatro fechas ya antes mencionadas), pueden ser representados a través de pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente, tal como lo muestra la imagen de la Figura 5. En la misma se presenta una distribución de valores máximos de resistividad eléctrica aparente medidos u observaciones (en tonalidades rojo y amarillo) hacia el lado del micro-bosque por parte de las 4 pruebas realizadas, mientras que los mínimos representados en tonalidades azul y celeste se concentran en la zona de pastos.

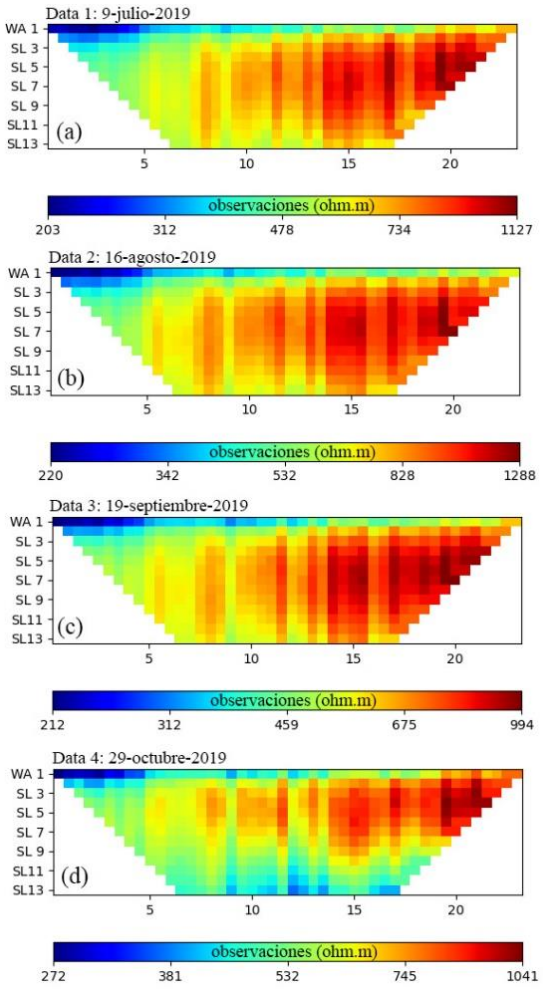


Fig. 5. Pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente (observaciones) obtenidos durante las jornadas (a) 1, (b) 2, (c) 3 y (d) 4.

Es importante recalcar que esta representación gráfica no se puede interpretar como una tomografía final en sí, ya que se requiere de la inversión de estos datos para poder obtener un modelo acorde con la realidad geológica del sitio. El rango de valores de resistividad eléctrica aparente medidos en campo, para estas cuatro pruebas, oscila entre 203 y 1288 ohm.m.

C. Resultados del análisis de lapso temporal de tomografía de resistividad eléctrica 2D

En esta sección se presentan los resultados de los procesos de inversión obtenidos con el código BERT estableciendo como valor del parámetro de regularización $\lambda = 20$. Este parámetro controla la intensidad de restricción suave y, por

ende, define qué tan suave el modelo final es. La Figura 6 presenta el resultado de la inversión de las 4 pruebas.

El rango de valores de resistividad eléctrica calculada que presentan estos resultados oscila entre 92 y 3390 ohm.m; en las cuatro tomografías se puede identificar a nivel superficial una anomalía en tonalidad azul cuyo rango de valores de resistividad eléctrica calculada varía entre 92 y 558 ohm.m y con profundidades que no superan 1 m.

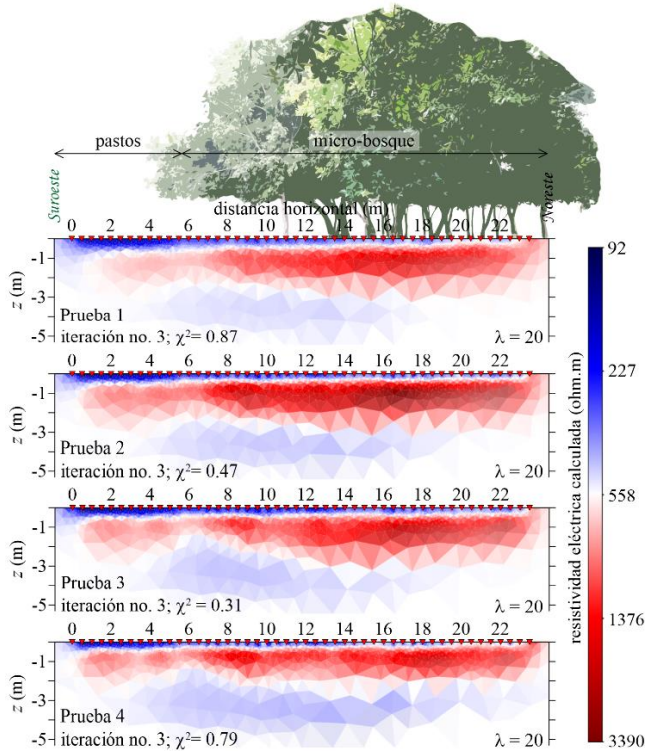


Fig. 6 Tomografías de resistividad eléctrica obtenidas posterior a la resolución del problema inverso (λ = 20) a través del análisis de lapso temporal tomográfico.

Las Pruebas 1 y 2 muestran una mayor extensión de dicha anomalía tanto a nivel lateral como en profundidad; esto se encuentra relacionado a la presencia de fuertes lluvias que se dieron lugar durante los días anteriores a estas pruebas, ya que la presencia de humedad en el subsuelo genera una disminución de sus propiedades eléctricas. Por su parte, la ausencia de lluvias durante los días anteriores a las Pruebas 3 y 4 se revela a través de disminución en la dimensión de la anomalía de baja resistividad eléctrica calculada.

Por otro lado, se puede identificar claramente una anomalía de resistividad eléctrica en tonalidad roja, y con valores de resistividad eléctrica calculada que oscilan entre 558 y 3390 ohm.m, con una profundidad que varía entre 1.5 y 3.0 m. Esta anomalía se presenta en todas las pruebas, y los valores más altos de resistividad se concentran en el micro-bosque por la presencia de las raíces; sin embargo, su intensidad se incrementa en la Prueba 2 mientras que en el resultado obtenido en la Prueba 4, hay una disminución en su dimensión. En la zona de pastos, se observa que la intensidad de la mencionada anomalía disminuye notablemente como producto de la ausencia de raíces de gran magnitud.

A partir de estos resultados, el código generó un conjunto de tomogramas de cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada tal como lo muestra la Figura 7. En este resultado, las variaciones positivas representadas en tonalidades amarillo y rojo y con valores porcentuales que oscilan entre 25% y 100%, indican un aumento en el valor de la resistividad eléctrica del subsuelo y por ende, una disminución en su contenido de humedad; contrariamente, las variaciones negativas representadas en tonalidades celeste y azul oscuro y con valores porcentuales que se extienden entre -12.5% y 100% indican una disminución en el valor de la resistividad eléctrica y con ello, un incremento en el contenido de humedad del subsuelo.

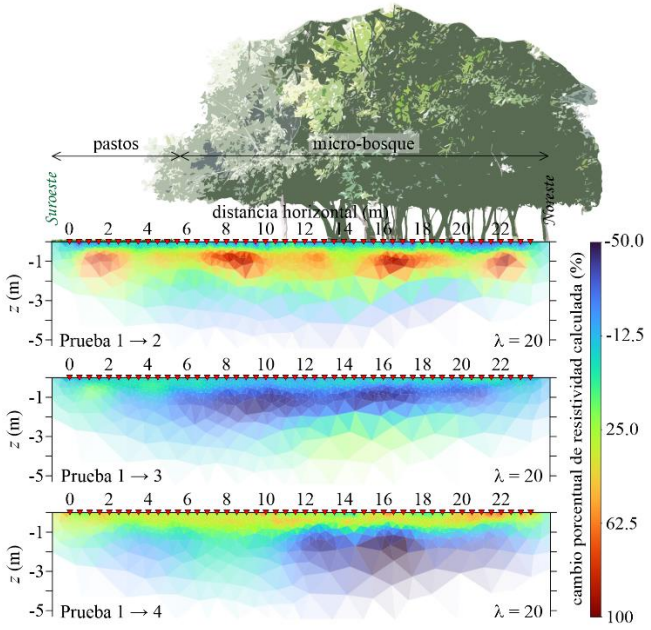


Fig. 7. Tomografías de los cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada que se dieron lugar entre la prueba 1 → 2 (superior), la prueba 1 → 3 (centro) y la prueba 1 → 4 (inferior), para λ = 20.

En el primer resultado de la Figura 7 (Prueba 1 → 2) se presenta un horizonte superficial en tonalidades celeste y azul los cuales revelan una disminución de la resistividad eléctrica calculada hasta una profundidad de aproximadamente 0.4 m; este efecto podría asociarse al fuerte nivel de precipitación que se dio lugar el día anterior de la Prueba 2, en relación con el día anterior de la Prueba 1 cuyo nivel de precipitación fue inferior. Seguidamente, se presenta una anomalía porcentual de valores positivos indicando un fuerte grado de absorción de humedad en el subsuelo de la zona constituida por el micro-bosque.

En el segundo resultado (Prueba 1 → 3), los cambios porcentuales negativos se presentan casi en la totalidad del espacio ocupado por la tomografía, incrementándose más hacia el máximo (-50 %) en la zona ubicada por debajo del micro-bosque. Esta disminución de la resistividad eléctrica calculada indica una disminución en los niveles de absorción de humedad por las raíces de los árboles que forman parte del micro-bosque. Por otro lado, la zona de pastos no presenta cambios significativos en los valores de resistividad eléctrica calculada.

Por su parte, en el tercer resultado (prueba 1 → 4) se puede identificar una anomalía de cambio porcentual en tonalidad amarilla la cual se extiende sobre todo el perfil y alcanza una profundidad que varía entre 0.5 y 1.0 m, hecho que indica un aumento entre aproximadamente 25.0% y 62.5%. Esta anomalía refleja un déficit superficial de humedad entre la

primera y última prueba. Sin embargo, la anomalía de cambio porcentual de resistividad eléctrica calculada en tonalidad azul (en la zona del micro-bosque) tiende a reducirse lateralmente, pero tiende a extenderse levemente de forma vertical. El resto de las anomalías en tono celeste, las cuales representan cambios o disminuciones moderados en el valor de la resistividad eléctrica calculada, ocupan los primeros 10 m del perfil por debajo de la anomalía en tonos amarillo y café, lo que indica también un bajo nivel de absorción por parte de las raíces que forman parte del micro-bosque y de la zona de pastos.

D. Tomografías de contenido volumétrico de humedad

Transformando las tomografías de resistividad eléctrica calculada de la Figura 6 en tomogramas de contenido volumétrico de humedad (empleando la misma ecuación empírica obtenida a través de la Ley de Archie, se obtuvo el resultado de la Figura 8.

En este resultado se observa que los valores más bajos de contenido volumétrico de humedad (representados a través de anomalías en tonalidades rojo ladrillo y amarillos y con valores que oscilan entre 2.0% y 3.3 %) se concentran por debajo de la zona del micro-bosque mientas que los más altos, representado en tonos azules (8.7% y 17.4 %) se concentran en la zona de pastos.

Es importante recalcar que valores intermedios de contenido volumétrico de humedad (5.4% y 8.7 %) se pueden identificar claramente entre los 6 m y el resto del perfil de forma superficial. Este resultado concuerda con las interpretaciones presentadas en las subsecciones anteriores en donde las raíces del micro-bosque tienden a absorber mayor humedad mientras que la zona de pastos tiende a reducir el nivel de absorción de humedad.

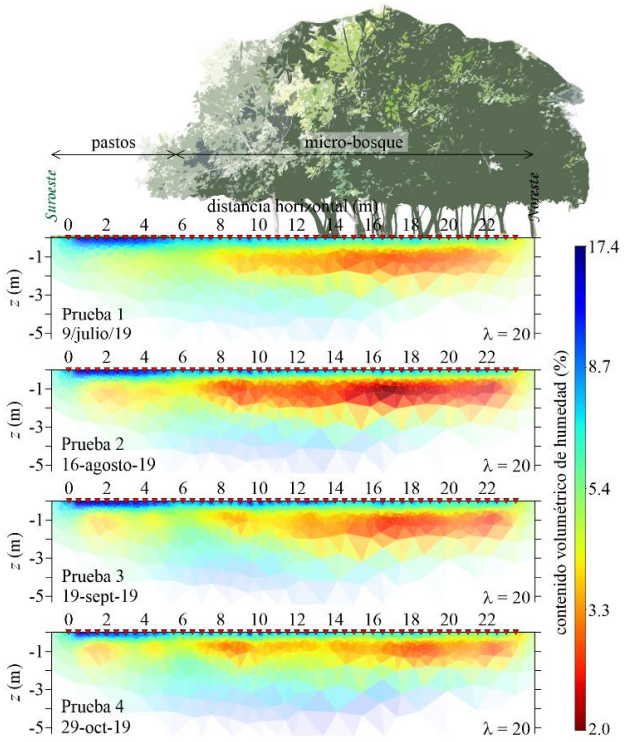


Fig. 8. contenidos volumétricos de humedad derivados de la aplicación de la ley empírica de Archie (ecuación 4) al conjunto de valores de resistividad eléctrica calculada para λ = 20.

CONCLUSIONES

Se logró establecer una zona de estudio muy importante ubicada en una zona abierta del CITT-UTP de Aguadulce y cuya importancia radica en que forma parte del Arco Seco del Istmo de Panamá, estando la misma compuesta por una zona de pastos y la otra, por un micro-bosque constituida por árboles y una notable actividad biológica a nivel de subsuelo; también hemos seleccionado un período de aproximadamente cuatro meses, a partir del 9 de julio, hasta el 29 de octubre de 2019 correspondiente a la época lluviosa del año, y siendo octubre la más intensa a nivel de actividad pluviométrica. Las tomografías de resistividad eléctrica obtenidas lograron cuantificar de forma clara los contrastes existentes entre ambas zonas (ausencia y presencia de raíces). Por otro lado, la transformación de los valores de resistividad eléctrica calculada (producto de la inversión 2D) a valores de contenido volumétrico de humedad (mediante la Ley de Archie), nos permitieron cuantificar las diferencias en los niveles de absorción de humedad en los dos tipos de vegetación, siendo la zona compuesta por raíces del micro-bosque, caracterizada por presentar un rango bajo de valores de contenido volumétrico de humedad (zona de mayor absorción de agua) registrándose menor nivel de humedad durante la Prueba 2; y la zona de pastos, con el de mayor rango de estos valores, con una mayor concentración de humedad durante la Prueba 1. Los resultados se ajustan a la actividad pluviométrica registrada durante los cinco días que antecedieron a cada prueba. Por otro lado, el monitoreo de los cambios porcentuales de resistividad eléctrica calculada (producto de la inversión geofísica), mostró la evolución de los niveles de humedad de la zona de estudio como respuesta a las variaciones climáticas y los procesos de vegetación, con cambios poco significativas a nivel superficial entre las Pruebas 1 y 2 debido a la ocurrencia de lluvias durante ese período, pero con un aumento en el cambio porcentual en el área de las raíces del micro-bosque lo que indica un mayor nivel de absorción de humedad bajo todo el perfil entre esas fechas. En los resultados consecutivos, se presenta una disminución en los niveles de absorción en el área de las raíces del micro-bosque, y un leve aumento entre las pruebas 1 y 4 debido a la disminución en la razón de lluvias ocurrida entre ambas pruebas. Estos resultados pueden ser clave en el desarrollo de nuevas herramientas que permitan anticipar cambios globales en el uso del subsuelo que estén ligados a procesos antrópicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Centro Experimental de Ingeniería y al Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica (CITT) de la Universidad Tecnológica de Panamá por las facilidades brindadas en el desarrollo de los trabajos de campo, y a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) por todo el apoyo para el desarrollo de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

[1] B. R. Scanlon, I. Joly, M. Sophocleous, y L. Zahang, "Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality," *Water Resour. Res.*, vol. 43, pp. W03437, Marzo 2007.

[2] D. H. Jayawickreme, R. L. Van Dam, y D. W. Hyndman, "Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, pp. L18404, Septiembre 2008.

[3] S. I. Seneviratne, D. Lüthi, M. Litschi, y C. Schär, "Land-atmosphere coupling and climate change in Europe," *Nature*, vol. 443, pp. 205–209, Septiembre 2006.

[4] R. Barker, y J. Moore, "The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies," *The Leading Edge*, vol. 17, pp. 1454–1458, Octubre 1998.

[5] K. Singha, y S.M. Gorelick, "Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis," *Water Resour. Res.*, vol. 41, pp. W05023, Mayo 2005.

[6] V. Leroux, y T. Dahlin, "Time-lapse resistivity investigations for imaging saltwater transport in glaciofluvial deposits," *Environ. Geol.*, vol. 49, pp. 347–358, Noviembre 2005.

[7] G. Casiani, V. Bruno, A. Villa, N. Fusi, y A. Binley, "A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography," *J. Appl. Geophy.*, vol. 59, pp. 244–259, Julio 2006.

[8] C. R. Miller, P. S. Routh, T. R. Brosten, y J. P. McNamara, "Application of time-lapse ERT imaging to watershed characterisation," *Geophysics*, vol. 73, pp. 7–17, Mayo 2008.

[9] P. Brunet, R. Clément, y C. Bouvier, "Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT)–A case study in the Cevennes area, France," *J. Hydrol.*, vol. 380, pp. 146–153, Enero 2010.

[10] A. Mojica, I. Díaz, C. A. Ho, F. Ogden, R. Pinzón, J. Fábrega, D. Vega, y J. Hendrickx, "Study of seasonal rainfall infiltration via time-lapse surface electrical resistivity tomography. A case study of Gamboa area, Panama Canal Watershed," *Air, Soil Water Res.*, vol. 6, pp. 131–139, Diciembre 2013.

[11] G. F. Litt, F. L. Ogden, A. Mojica, E. W. Kempema, C. B. Gardner, J. A. Regina, J. Bruce, J. Harrison, J. M. H. Hendrickx, M. Bretfeld, Y. Cheng, R. F. Stallard, J. S. Hall, y W. B. Lyons, "Land Cover Effects on Soil Infiltration Capacity Measured Using Plot Scale Rainfall Simulation in Steep Tropical Lowlands of Central Panama," *Hydrol. Process.*, vol. 34, pp. 878–897, Febrero 2020.

[12] A. Mojica, B. Duarte, F. Vergara, M. Pinto, R. Pinzón, J. Pérez, M. Castrellón, C. A. Ho, y M. Gómez, "Time-lapse electrical resistivity tomography for assessment of seasonal moisture variations in a tropical regolith," *Hydrol. Res. Lett.*, vol. 16, pp. 18–24, Marzo 2022.

[13] C. Rücker, T. Günther, y K. Spitzer, "Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity dataincorporating topography-I. Modelling," *Geophys. J. Int.*, vol. 166, pp. 495–505, Agosto 2006.

[14] T. Günther, C. Rucker, y K. Spitzer, "Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography-II. Inversion," *Geophys. J. Int.*, vol. 166, pp. 506–517, Agosto 2006.

[15] S. K. Park, y G. P. Van, "Inversion of pole-pole data for 3-d resistivity structure beneath arrays of electrodes," *Geophysics*, vol. 56, pp. 951–960, Julio 1991.

[16] T. Günther, "Timelapse ERT inversion approaches and their applications," in *1st International Workshop on Geoelectrical Monitoring (GELMON)*, Vienna, Austria, 2011, pp. 91–97.

[17] T. Günther, y C. Rücker, "Boundless Electrical Resistivity Tomography BERT 2," the user tutorial, Abril 2019. Disponible en: http://www.resistivity.net/download/bert-tutorial.pdf

[18] P. Wilkinson, J. Chambers, O. Kuras, P. Meldrum, y D. Gunn, "Long-term time-lapse geoelectrical monitoring," *First Break*, vol. 29, pp. 77–84, Agosto 2011.

[19] G. E. Archie, "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics," *Petroleum Transactions of AIME*, vol. 146, pp. 54–67, Diciembre 1942.

Analysis of the Potential of Remote Piloted Aircraft in the Detection of Damage by Frost in Coffee Plants

Diego Bedin Marin
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0001-7526-0825

Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Department of Agricultural Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0001-6403-2210

Felipe Schwerz
Department of Agricultural Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0001-5266-4309

Rafael Alexandre Pena Barata
Department of Agricultural Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0002-6575-2364

Rafael de Oliveira Faria
Department of Agricultural Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0003-0488-0204

Lucas Santos Santana
Department of Agricultural Engineering
Federal University of Lavras
Lavras, Brazil
0000-0001-7489-3225

Valentina Becciolini
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0002-1344-4634

Giuseppe Rossi
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry
University of Florence/UNIFI
Florence, Italy
0000-0003-0211-9294

***Abstract*— The current methods for monitoring and evaluating the frost damage of coffee plants are not only costly but also impractical in areas of extensive cultivation. Therefore, remote sensing using Remotely Piloted Aircraft (RPA) can be a feasible alternative, providing coffee producers with a fast, continuous, and accessible method to identify and evaluate the frost damage in coffee plants. Therefore, the objective of this study was to evaluate the frost damage in coffee plantations using multispectral images obtained from RPA. For the analysis of frost on the coffee plants, 18 sampling points were selected in the field. Each sampling point consisted of 5 plants, 1 central plant and 2 sets of 2 plants in the east-west direction from the main plant. The evaluations of the frost damage were performed visually through scores. Subsequently, 3 levels were defined according to the percentage of damage to the plant. The images were obtained with a multispectral camera coupled to an RPA with rotating wings. The spectral signatures of each of the 3 levels of frost damage were determined. The spatial distribution of the frost damage on the plantation allowed the identification of the plantation regions most susceptible to the effects of frost. The spectral signatures made it possible to differentiate coffee plants with different levels of frost damage. The Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI) showed the most significant variation in the different levels of frost damage, during the Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) had the slightest deviation..**

Keywords*— *Remotely piloted aircraft, vegetation indices, precision agriculture, climate change

I. INTRODUCTION

Brazil is the largest producer and exporter of coffee; Brazil accounts for approximately 36% of the world's production and 29% of the exports, and coffee generates a turnover of approximately USD 6.2 billion per year for the country. This economic importance of Brazilian coffee production at the international level is also reflected in the domestic market, since Brazil, in addition to being the largest coffee producer and exporter, is the second-largest consumer market in the world [1]. In addition, coffee production has relevant social importance as an activity that generates jobs and secures labour in the field [2].

Most of the national production comes from the South and Southeast regions, which have climatic conditions that can limit the development and productivity of coffee plantations. Among the climatic conditions, frost causes the most significant damage to crops and, consequently, the greatest damage to producers, as coffee plants are susceptible to low temperatures [3]. The damage caused by frost on coffee plants can cause the death of plant tissue by a physicochemical process. In this process, there is cell dehydration, loss of turgidity potential, increase in solute concentration, reduction in cell volume and rupture of the plasma membrane. The result is a reduction in income in the year of occurrence, with impacts in the following years [4].

Despite the knowledge of the negative effects of frost on coffee crops and its frequent occurrence over the last few years, there is still no precise and defined methodology for assessing damage to coffee trees affected by frost. Therefore,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00108

developing new techniques or methods that can accurately evaluate the effects of frost is essential for maintaining and developing the coffee plantation in regions susceptible to frost.

In this context, Remotely Piloted Aircraft (RPA) can be a viable tool in collecting and assessing frost damage in coffee plantations. RPA is an emerging technology that has gained increasing popularity in the remote sensing community in recent years, mainly due to its ability to continuously obtain high spatial resolution images [5]. Unlike remote sensing based on orbital or airborne sensors, RPAs are operated at low altitudes and therefore are less constrained by weather conditions, involve lower cost and complexity in operations, and enjoy high deployment flexibility for repeated missions [6,7]. In addition, they can be applied to smaller areas and specific locations with the ease of obtaining data in less time, such as monitoring and identifying frost damage.

RPA has been successfully used to evaluate different conditions of coffee plants, such as nitrogen content [8,9], disease [10], biophysical parameters [11], planting errors [12] and fruit detection and maturation [13,14]. However, assessing frost damage, there is still a considerable gap to be filled.

Therefore, based on the hypothesis that the use of RPA can solve the problems of data collection regarding the occurrence of frost, the objective of this work was to evaluate the damage caused by frost in coffee plantations through multispectral images obtained by RPA.

II. Material and Methods

A. Description of the study area

A field experiment was performed on a commercial farm on the Bom Jardim farm, located in the municipality of Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brazil, with geographical coordinates 21°01′11.93″ S, 44°55′24.46″ W and an altitude of 927 m (Fig. 1). The region's climate, according to the Köppen climate classification, is Cwa (humid subtropical), with hot and humid summers and cold and dry winters, with an annual average air temperature of 19.8°C and average annual total rainfall of 1,670mm [15]. The area has an approximate 3.5 ha, cultivated with coffee crop (*Coffea arabica* L.), of the cultivar Catucaí Vermelho IAC 144, with 6 years since initial planting, with a spacing of 3.5m between rows and 0.5m between plants, totalling 5,700plants.ha^{-1} (Fig. 1). The occurrence of frost was observed on July 8 and 9. The minimum temperatures on these days were 1.8 and 0.3°C, respectively. An automated weather station on the property measured the minimum temperature on those days. For the in situ analysis of the frost damage of coffee plants, 18 sampling points were marked at the plantation. Each sampling point consisted of 5 plants, 1 central plant, and 2 sets of 2 plants in the east-west direction from the main plant.

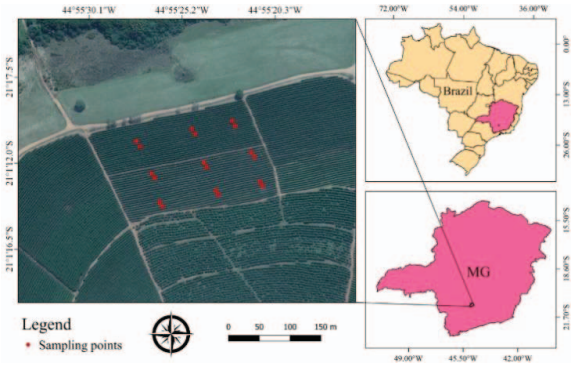


Fig. 1 Geographical location of the study area.

B. Evaluation of the frost damage

The evaluations of the frost damage were performed visually by the attribution of scores. For this, three experts in the field of agriculture and with experience in the area of coffee production went to the field for evaluation and assigned scores (percentage of the plant with damage to the leaves, branches, and stems) to the previously selected plants. After this, the data were compiled, and the mean of the three observers was calculated. Subsequently, 3 levels were defined according to the percentage of damage to the plant: healthy = 0% (or no damage), moderate = up to 50% of the plant was damaged, and severe = more than 50% of the plant was damaged.

C. Image acquisition and processing

Sequoia multispectral camera (MicaSense, Seattle, WA, United States) was embedded in commercial RPA 3DR Solo. The camera has four 1.2-megapixel monochrome sensors that collect global shutter imagery along four discrete spectral bands: green (530–570 nm), red (640–680 nm), red-edge (730–740 nm) and near-infrared (770–810 nm). The horizontal (HFOV), vertical (VFOV) and diagonal (DFOV) fields of view of the multispectral camera are 61.9º, 48.5º and 73.7º, respectively, with a focal length of 4mm. Additionally, to transform the digital numbers (grey levels) from the sensors to reflectance values, a calibrated reflectance panel (MicaSense, Seattle, WA, United States was used before and after the flight.

The flights were performed between 12h and 14h local time to obtain good lighting conditions and avoid shadows. Flight planning was performed by using the free software Mission Planner [16], which was executed on a portable computer. The parameters adopted were an altitude of 60m, a mean speed of 3 m.s^{-1}, and a frontal and lateral overlap of 80%, which resulted in a spatial resolution of 6.44 cm.

Image processing was performed using Pix4Dmapper, version 4.4.12 (Pix4D, Lausanne, Switzerland). Pix4d follows a 3-step workflow [17]. Initially, the software calculates the key points in the images and uses them to find correspondences between them. From these initial correspondences, the software performs several automatic aerial triangulation (AAT), bundle block adjustment (BBA), and iterative steps of camera autocalibration until ideal reconstruction is achieved. Next, a densified point cloud is generated to obtain a highly detailed digital surface model

(DSM). Subsequently, based on the DSM, reflectance maps and vegetation indices are generated.

The spectral signature was obtained in the software QGIS 2.18.13by using the semi-automatic classification plugin (SCP) developed by [18]. The reflectance at the wavelengths of green, red, red-edge, and near-infrared was measured at each sampling point referring to the levels of frost damage. For this, the mean reflectance at each wavelength in the pixels present in a 0.20m radius was calculated from the center of each plant, totalling 90 measurements.

The vegetation indices used in this study were based on the combination of reflectance values in the green, red, red-edge and near-infrared spectral bands (Table 1). The choice of vegetation indices was based on the ability of these indices to assess and identify frost damage in different crops since, for coffee, only the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was previously analyzed.

Table 1. Vegetation indices obtained from reflectance in the green, red, red-edge and near-infrared spectral bands

Vegetation indices	Equation	Reference
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{\rho_{nir}-\rho_{green}}{\rho_{nir}+\rho_{green}}$	[19]
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{\rho_{nir}-\rho_{red}}{\rho_{nir}+\rho_{red}}$	[20]
NDRE (Normalized Difference Red Edge)	$\frac{\rho_{nir}-\rho_{edge}}{\rho_{nir}+\rho_{edge}}$	[21]
MPRI (Modified Photochemical Reflectance Index)	$\frac{\rho_{green}-\rho_{red}}{\rho_{green}+\rho_{red}}$	[22]

ρblue: reflectance in the blue band; ρgreen: reflectance in the green band; ρred: reflectance in the red band; ρnir: reflectance in the near-infrared band; ρedge: reflectance in the red-edge band

The Raster Calculator tool in the QGIS software was used to calculate the indices. Subsequently, to assess the potential of vegetation indices to differentiate levels of frost damage (severe, moderate and healthy), the mean values of each vegetation index within a 20 cm radius from the center of each sampled plant were extracted using the Zonal Statistics plugin, also present in QGIS.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. *Spatial distribution of the frost damage*

The spatial distribution of the frost damage in the plantation is shown in Fig. 2. It was observed that the plants in the southern region of the plantation showed no frost damage. In contrast, the plants in the northern region of the plantation showed severe damage. The plants in the central region of the plantation showed moderate damage.

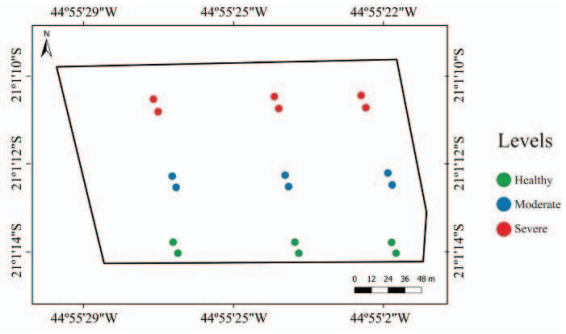


Fig. 2. Spatial distribution of the frost damage on the plantation

Knowing the spatial distribution of frost damage is essential for producers adequately managing plantations. Thus, producers have sought alternatives that replace the current methods of assessing frost damage, which in addition to being costly, are not viable in extensive cultivation areas. Given this, [23] used the orbital images to evaluate the impact of frost on a state scale. The results demonstrated the potential of orbital images to evaluate the impact on coffee plants per frost event. However, orbital images have limitations compared to suborbital images through RPA.

B. *Spectral signature of coffee plants with frost damage*

The mean reflectance of coffee plants at the wavelengths of green, red, red-edge, and near-infrared for different levels of frost damage is shown in Fig. 3.

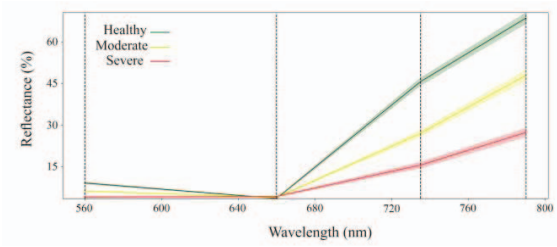


Fig. 3. Spectral signatures of coffee plants at different levels of frost damage

As expected for the vegetation, the spectral signatures showed greater reflectance in the near-infrared region than in the visible region. Coffee plants and vegetation generally reflect more energy in the near-infrared spectral region. This is due to the interaction of energy with the internal structures of the leaves and the structure of the canopy itself through the absorption of energy in large quantities due to the photosynthetic pigments of plants such as chlorophyll and anthocyanin [24-26].

Regarding the plantation regions with the occurrence of frost, the plants with more severe damage had higher reflectance values at the red and red-edge wavelengths. In comparison, the plants with no damage had higher reflectance values at the green and near-infrared wavelengths. Frost damage can cause physiological changes in plant leaves, such as decreases in photosynthesis and chlorophyll content in the

leaves, dehydration, and decreases in biomass, and consequently, modify the spectral characteristics of the vegetation by reducing reflectance in the near-infrared region and increasing reflectance in the visible spectral region [27]. Similar to this study, [26] monitored the impact of frost on winter wheat and observed that the reflectance in wheat with no damage was lower in the visible spectral region and higher in the near-infrared region than that of the wheat affected by frost. [28] also observed that the reflectance in oilseed rape leaves gradually decreased according to frost freezing time. Therefore, multispectral images obtained by RPA can differentiate coffee plants affected by the frost from healthy coffee plants.

C. *Vegetation indices*

The average values of vegetation indices in plants with different levels of frost damage can be seen in Table 2.

Table 2. Mean values of vegetation indices in plants with different levels of frost damage

Vegetation indices	Healthy	Moderate	Severe
MPRI	0.42	0.19	-0.02
NDVI	0.89	0.82	0.72
NDRE	0.21	0.28	0.28
GNDVI	0.76	0.76	0.73

The MPRI showed the most significant variation (0.44) between plants considered healthy and plants with severe frost damage. On the other hand, the GNDVI had a minor variation (0.03). Regarding the variation between plants with moderate and severe damage, the MPRI also presented the most significant variation (0.21), while the NDRE did not show variation. It is worth mentioning that only the NDVI and MPRI indices showed variation between the levels of frost damage. The other indices, GNDVI and NDRE, could not differentiate all levels of frost damage.

Gabrielli et al. [29], evaluating frost damage in White Mustard from vegetation indices obtained from Sentinel-2 images, found different results from this study. The NDRE index presented the highest value of R^2 (0.46) compared to the NDVI (0.21).

Although the MPRI, an indice that uses only the reflectance in the visible bands, showed the most significant variation, a greater variation was expected for the NDVI, GNDVI and NDRE indices, indices that use the combination of the near-infrared with the visible bands, because as shown in Figure 3, the variation in near-infrared reflectance at different levels of frost damage to plants is more pronounced when compared to reflectance in the visible bands. This relationship can be observed in Gabrielli et al. [29]. The authors demonstrate that the VIs calculated from the reflectance values in the red and red-edge regions were the most correlated with frost damage in White Mustard.

The variation in the values of vegetation indices due to frostbite on leaves could also be observed in other studies and cultures. Feng et al. [30] reported that the NDVI value of winter wheat drops dramatically after frostbite, and therefore NDVI can be used to monitor frostbite in winter wheat over large areas. XXX [23] demonstrated that the NDVI values in coffee plantations vary soon after the frost, allowing us to visualize the extension of the affected area. Gabrielli et al. [29] observed that vegetation indices decrease as the frost index in White Mustard increases.

In this context, the VI can be used as another tool to support the producer in the management of their coffee plantations as a result of the damage caused by frost. However, for the methodology proposed in this study to be consolidated, other studies must be carried out exploring other regions, different species of coffee trees and different RPA and multispectral sensors.

IV. CONCLUSIONS

This study showed that producers could use RPA to monitor and evaluate frost damage in coffee plantations. The spatial distribution of frost damage and the DSM of the plantation allowed the identification of the plantation regions most susceptible to the effects of frost. The spectral signatures made it possible to differentiate coffee plants with different levels of frost damage. The Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI) showed the most significant variation in the different levels of frost damage. The Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), had a minor deviation.

The monitoring and evaluation of frost damage in coffee plantations with the use of RPA are essential to optimize and facilitate decision-making by the producers. This can significantly reduce production costs and minimize frost damage.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Embrapa Café - Research Coffee Consortium, project no. 10.18.20.041.00.00, by National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), , the Brazilian Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES). The authors also would like to thanks the Federal University of Lavras (UFLA), the Bom Jardim farm, and the University of Florence (UniFi).

REFERENCES

[1] United States Department of Agriculture (2022). *Coffee: world markets and trade Foreign Agricultural Service/USDA*. Available: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf

[2] B. B. Ribeiro, L. M. V. L. Mendonça, G. A. Assis, J. M. A. Mendonça, M. R. Malta, and F. F. Montanari, "Evaluation of the Chemical and Sensory Characteristics of *Coffea canephora* Pierre and *Coffea arabica* L. BLENDS," *Coffee Science*, vol. 9, no. 2, p. 178-186, June 2014.

[3] J. B. Matiello, and S. R. Almeida. (2016*) Deu geada no cafezal, não façam podas já.* Available:: http://www.cccrj.com.br/revista/839/24.pdf

[4] J. C. Ramalho, F. M. DaMatta, A. P. Rodrigues, P. Scotti-Campos, I. Pais, P. Batista-Santos, et al., "Cold impact and acclimation response of *Coffea* spp," *Plants Theoretical and Experimental Plant Physiology*, vol. 26, no. 1, pp. 5-18, Feb. 2014.

[5] A. Rango, A. Laliberte, C. Steele, J. E. Herrick, B. Bestelmeyer, T. Schmugge, et al., "Using unmanned aerial vehicles for rangelands: current applications and future potentials," *Environmental Practice, Abingdon*, vol. 8, no. 3, pp. 159-168, July 2006.

[6] E. R. Hunt, W. D. Hively, S. J. Fujikawa, D. S. Linden, C. S. T. Daughtry, and G. W. McCarty, "Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring," *Remote Sensing*, vol. 2, no. 1, pp. 290-305, Jan. 2010.

[7] A. S. Laliberte, M. A. Goforth, C. M. Steele, and A. Rango, "Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: Image processing workflows and applications for rangeland environments," *Remote Sensing*, vol. 3, no. 11, pp. 2529-2551, Nov. 2011.

[8] D. B. Marin, G. A. S. Ferraz, P. H. S. Guimarães, F. Schwerz, L. S. Santana, B. D. S. Barbosa, et al. "Remotely Piloted Aircraft and Random Forest in the Evaluation of the Spatial Variability of Foliar Nitrogen in Coffee Crop," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 8, pp. 1471, Apr. 2021.

[9] T. C. Parreiras, G. H. E. Lense, R. S. Moreira, D. B. Santana, and R. L. Mincato, "Using unmanned aerial vehicle and machine learning algorithm to monitor leaf nitrogen in coffee," Coffee Science, vol. 15, pp. 1-9, 2020.

[10] D. B., Marin, L. S. Santana, B. D. S. Barbosa, R. A. P. Barata, L. P. Osco, A. P. M. Ramos, et al., "Detecting coffee leaf rust with UAV-based vegetation indices and decision tree machine learning models," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 190, pp. 106476, Nov. 2021.

[11] L. M. Santos, G. A. S. Ferrazm B. D. S. Barbosa, A. V. Dioto, M. T. Andrade, L. Conti, et al., "Determining the Leaf Area Index and Percentage of Area Covered by Coffee Crops Using UAV RGB Images," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 6401-6409, 2020.

[12] L. S. Santana, G. A. S. Ferraz, J. P. B. Cunha, M. S. Santana, R. O. Faria, D. B. Marin, D. B. et al., "Monitoring errors of semi-mechanized coffee planting by remotely piloted aircraft," *Agronomy*, vol. 11, no. 6, pp. 1224, Jun. 2021.

[13] G. L. A. Carrijo, D. E. Oliveira, G. A. Assis, M. G. Carneiro, V. C. Guizilini, and J. R. Souza, "Automatic detection of fruits in coffee crops from aerial images," *in 2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR)*, Curitiba, PR, 2017, pp. 1-6.

[14] R. N. Martins, F. A. C. Pinto, D. M. Queiroz, D. S. M. Valente, and J. T. F. Rosas, "A Novel Vegetation Index for Coffee Ripeness Monitoring Using Aerial Imagery," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 2, pp. 263, Jan. 2021.

[15] A. F. Freitas, D. H. S. Nadaleti, H. R. O. Silveira, G. R. Carvalho, R. P. Venturin, V. A. Silveira, et al., "Productivity and beverage sensory quality of arabica coffee intercropped with timber species," *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 55, 2020.

[16] M. Oborne (2018). *Mission Planner*. Available: http://ardupilot.org/planner/index.html

[17] J. M. Fernández-Guisuraga, E. Sanz-Ablanedo, S. Suárez-Seoane, and L. Calvo, "Using unmanned aerial vehicles in postfire vegetation survey campaigns through large and heterogeneous areas: Opportunities and challenges," *Sensors*, vol. 18, no. 2, pp. 586. Feb., 2018.

[18] L. Congedo (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Available: https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/

[19] A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, and M. N. Merzlyak, "Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS," *Remote sensing of Environment*, vol. 58, no. 3, pp. 289-298. Dec. 1996.

[20] J. W. Rouse, R. H. Haas, D. W. Deering, J. A. Schell, and J. C. Harlan, "Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation," Greenbelt: NASA/GSFC, Type III, Final Report, 1974.

[21] A. Gitelson, and M. N. Merzlyak, "Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 22, no. 3, pp. 247-252, Mar. 1994.

[22] Z. Yang, P. Willis, and R. Mueller, "Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy," in *Proceedings of the 17th William Pecora Memorial Remote Sensing Symposium*, Denver, CO, USA, 2008, pp. 1-11.

[23] D. R. Rafaelli, M. A. Moreira, and R. Farias, "Análise do potencial de dados MODIS para monitorar o impacto de geada em nível estadual e em lavouras de café," *Agricultura em São Paulo*, vol. 53, no. 1, pp. 5-15, Jan. 2006.

[24] M. R. Slaton, E. R. Hunt Jr, and W. K. Smith, "Estimating near‐infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics,' *American Journal of Botany*, vol. 88, no. 2, pp. 278‐284, Feb. 2001.

[25] P. J. Pinter Jr, J. L. Hatfield, J. S. Schepers, S. James, E. M. Barnes, M. S. Moran, et al., "Remote sensing for crop management," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, no. 6, pp. 647-664, June 2003.

[26] H. Wang, Z. Huo, G. Zhou, L. Wu, and H. Feng, "Monitoring and forecasting winter wheat freeze injury and yield from multi-temporal remotely sensed data," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 22, no. 2, pp. 255–260, Nov. 2015.

[27] K. Prabhakara, W. D. Hively, and G. W. McCarty, "Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 39, pp. 88-102, July 2015.

[28] C. Wei, J. Huang, X. Wang, G. A. Blackburn, Y. Zhang, S. Wang, et al., "Hyperspectral characterization of freezing injury and its biochemical impacts in oilseed rape leaves," *Remote Sensing of Environment*, vol. 195, pp. 56-66, June 2017.

[29] M. Gabbrielli, M. Corti, M., Perfetto, V., Fassa, V, and L. Bechini, L, "Satellite-Based Frost Damage Detection in Support of Winter Cover Crops Management: A Case Study on White Mustard," *Agronomy*, vol. 12, no. 9, pp. 1-16, Aug. 2022.

[30] M. Feng, W. Yang, L, Cao, and G. Ding, "Monitoring winter wheat freeze injury using multi-temporal MODIS data," *Agricultural Sciences in China*, vol. 8, no. 9, pp. 1053-1062, Sept. 2009.

Low cost mechatronic device for hand grip function rehabilitation

Jervis Villalobos-Villegas
Mechatronics Engineering
Tecnológico de Costa Rica
Cartago, Costa Rica
jervisnw@gmail.com

Arys Carrasquilla-Batista
Mechatronics Engineering
Tecnológico de Costa Rica
Cartago, Costa Rica
acarrasquilla@itcr.ac.cr

Marta Vílchez-Monge
Mechatronics Engineering
Tecnológico de Costa Rica
Cartago, Costa Rica
mvilchez@itcr.ac.cr

Gabriela Ortiz-León
Mechatronics Engineering
Tecnológico de Costa Rica
Cartago, Costa Rica
gaby@itcr.ac.cr

***Abstract*—There are multiple factors that can cause limited or impaired hand movement such as cardiovascular accidents, repetitive motion injuries at work or old age. Various studies have shown that robot-assisted rehabilitation or therapy devices have a positive impact on the recovery of motor skills in the hands. However, access to this type of technology can be expensive and Costa Rica hospitals do not encourage its research. In this paper, a low-cost device is developed for the rehabilitation of the grip function with the hand. Elastic bands for exercise are used to create different levels of resistance to do a gripping movement. The device uses easily accessible and low-cost parts. In addition, it incorporates a microcontroller that allows recording the data of the movement and force made by the patient, for later analysis by a health professional. A user interface for exercise monitoring and a functional prototype is developed.**

Keywords—grip, hand rehabilitation, low cost, robotic device stroke

I. INTRODUCTION

The incidence of stroke in developing countries is increasing [1] and a high percentage of stroke survivors are left with limited movement that requires rehabilitation. The recovery process for stroke survivors is a long-time process, and hand movement can be one of the most difficult functions to recover. Therapy exercises for the hands can help restore fine motor skills, improve quality of life and in some cases prepare individuals for work opportunities.

The Costa Rican health system presents limitations for the implementation of rehabilitation technologies in hospitals [2]. The main factors affecting implementation are the difficulty in allocating research time to hospital staff, the bureaucratic processes for acquiring devices and the lack of research protocols. The implementation of rehabilitation technologies is important because there is a high demand for physical therapy in the country population, explained partially by its aging, however, in addition to factors already mentioned, the rehabilitation staff in Costa Rican hospitals has work overload. The development of these technologies at the national level is important, however, the engineering area in hospitals is not engaged in medical device research [3]. Therefore, the development of low-cost rehabilitation devices that can be implemented in hospitals to treat stroke patients and others with limited movement becomes important.

Currently, there are many robotic devices for rehabilitation in the market like the Amadeo Robot [3] and the RAPAEL glove [4], that allow to exercise for more than one hand function and have a wide range of sensors, but these commercial solutions come at a high price. In the other hand, several publications have been made presenting alternative solutions, like the one presented here. Many of these devices belong in the exoskeleton category. In [5] a small exoskeleton for the thumb is presented, this device uses a linear actuator to generate motion in the thumb and a simple axis force sensor to measure the force. In [6] a hand glove with artificial muscles is presented, this glove incorporates sensor to measures the displacement of each finger and McKibben pneumatic actuators to create motion. Other devices don't use the use exoskeleton approach. In [7] a device with linear actuators for motion in each finger is presented. Also, the device has pressure sensors in the finger tips sockets to measure to force exerted by the person.

Other solutions are presented for active exercise where the patient must move the hand on its own. Similar devices to the one presented here can be found in [8] and [9]. [8] is a study developed in California University. This is a simple device consisting of a handle, springs, and a displacement sensor built into the frame to exercise hand grip. [9] presents a similar structure to the one developed in this project. The device uses distance sensors to measure the position of the fingers and direct current motors to generate motion in the fingers.

Previous research has been developed at Instituto Tecnológico de Costa Rica for hand movement rehabilitation [10]. In this paper, a functional prototype of a hand grip strength measuring device with haptic feedback was developed. A prototype was built using 3D printing along with an existing haptic controller (Novint Falcon) that is used as an interface to collect data about performed rehabilitation exercises and send them to an IoT platform.

In this paper, a new rehabilitation device is presented. The device presented here has different resistance levels for the hand grip movement. It allows to monitor the motion and force capacities of the patient in real time and record the exercise data. Also, it uses low-cost and easy access elements while providing the same functionality as other more expensive solutions.

This paper is organized as follows. Section II describes the design of the device. Mechanical and material considerations are presented. Some explanations are given on the software platform being used and how it is integrated to

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00109

the acquisition and processing system. Section III describes the prototype manufactured, the user interface and the tests performed to characterize the device. Finally, some conclusions and perspectives are given in Section IV.

II. DESIGN APPROACH

The design goal is to develop a low-cost therapeutic device to aim on the recovery of grip strength. This device has different levels of resistance for the patient to progressively exercise the grip strength. The objective of the device is to be able to measure and register the performance of the patient so that it can be later evaluated by a professional in physical therapy.

A. Mechanical design.

A device consisting of a 3D-printed moving part that moves through 2 metallic rods was designed. The cylindrical bars work as rails that guide the translation movement of the moving part in a straight path. These cylindrical bars are connected to 2 vertical metallic supports.
Figure 1 shows the CAD model. The patient must place the palm of the hand in a plastic support and the fingers in the moving part (in red) to exert force against an elastic band (not shown in the image).

The moving part has two vertical segments. The segment where fingers are placed was designed with a curve to better adjust to human hand anatomy. The opposite side where the elastic band is placed was designed with a slot to safely hold the elastic band.

For the height of the moving part, the median width of an adult hand was considered. The height was set to 11cm, since the median width of a hand is 8.22 cm and the maximum is 11cm [11]. A maximum force of 200N was used to calculate the width of both vertical segments. A person who has suffered from a stroke can exert a gripping force of around 150N after 24 weeks of rehabilitation. Hence, working with 200N will assure that the moving piece holds for any person working under the 150N maximum.
The moving part was manufactured with PETG 3D printing plastic. This plastic was selected due to its good mechanic properties [12].

When working with parts manufactured by 3D printing, it is key to determine the effect of the percentage of infill, since it affects the mechanical properties of the part. The pieces were manufactured with an infill of 80%. To determine the elastic limit of this configuration, a characterization study [12] of parts manufactured in PETG with 3D printing was used, where it was determined that an infill of 80% produces an elastic limit of 28.78MPa. This value was considered for the mechanical simulations and to determine the dimensions of the part. Mechanical simulation software Inventor Professional was used to run the simulations. A width of 11mm was selected for both vertical segments after the mechanical simulation.

A set of 5 elastic bands (Figure 2) with different elastic constants were used as the resistance-adjustable element in the device. Small plastic hooks were sewn to the bands to allow for easy interchangeability. The bands were characterized using a tensile strength machine in the material's laboratory at Tecnológico de Costa Rica.

The characterization of the bands was performed taking as reference the method defined in [13]. A tensile strength test (Figure 3) was performed following norm ASTM D41216 (2021) (Standard Tensile Test Methods for Vulcanized Rubber and thermoplastic elastomers). A tensile strength machine MTSBionix, with a 2.5kN load cell was used for the test. Each tensile was cycle was performed with a 500mm/min rate, following norm [14]. 140mm x 25 mm rectangular dies were prepared with elastic bands for the test. A total of 3 tests were carried out for each elastic band and the force-deformation curve and equation was obtained for each band with the 3-tests average.

B. Sensor

A linear potentiometer was selected as position sensor for its simple use, linear behavior and low cost. The linear potentiometer (10kΩ) is located in the base of the device connected to the moving part in a way that the knob of the potentiometer moves along with the moving part.

To measure the force exerted by the patient, the force-deformation equations obtained from the elastic bands were used, the force is calculated as function of the position and the elastic constant of the bands.

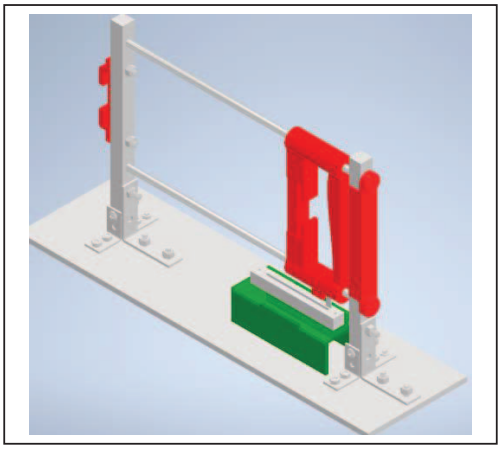


FIGURE 1. CAD model of the device

C. Microcontroller.

Only one analog input pin is required from the microcontroller since the design only uses one potentiometer as sensor. Also, the design requires a small microcontroller to reduce the space and make it easy to transport. The microcontroller Teensy 3.2 was used in the design. This microcontroller satisfies the requirements and it is easily accessible through local providers in Costa Rica.

FIGURE 2. Set of 5 elastic bands used for the device.

Teensy 3.2 microcontroller analog pin has a 3.3V voltage output with maximum current of 250mA. For a 3.3V input, the constant current in the 10kΩ potentiometer is 0.33mA, hence the microcontroller meets the current requirement.

The microcontroller was programmed with Python programming language using pyfirmata library. This library enables the communication with microcontroller through USB port. The "Standard Firmata" script from Arduino was loaded in the microcontroller to enable programming through Python. This script is available in Arduino official web page and enables data transmission in all pins through USB port. This is an advantage in the microcontroller because it is programmed with open access software.

D. User interface.

User interface was programmed with Python. This programming language uses the library pyfirmata to directly program the microcontroller Teensy3.2.

The capabilities programmed in the user interface are:

- Setting range of motion.
- Iterations counting.
- Graphically show position of the fingers.
- Graphically show force exerted by the hand.
- Selecting the elastic band currently installed in the device.
- Start and end of exercise buttons.
- Name of the patient and therapist fields.
- Registering exercise data into excel sheet.

The interface allows to select the elastic band that is being used at the moment and has fields to set an objective position for the patient to reach. It also shows in real time the position of the moving part and the force that is being applied. Every time the patient reaches the objective position, one iteration is added to the total progress of the exercise.

In the Python code, a thread was enabled to continuously read the analog input pin where the microcontroller is connected. The sampling period was set to 0.1s to read the analog input.

FIGURE 3. Tensile strength test to characterize the elastic bands.

When the "End exercise" button is pressed, all data from the exercise is saved to an excel file that can be accessed later to evaluate the performance of a patient, analyze the time it takes them to do an iteration and determine if there were failed tries to reach the goal position.

III. RESULTS

A. Mechanical.

The 3D printed parts were manufactured in "LAIMI 3D printing laboratory" at Tecnológico de Costa Rica. For the moving part, three iterations were printed to improve the design and printing parameters. The rest of the device was manufactured in the manufacturing laboratory from Tecnológico de Costa Rica.

Figure 4 shows the prototype of the device. Interchangeable elastic bands (A) with five different elastic constants were used to create the resistance levels. The 3D

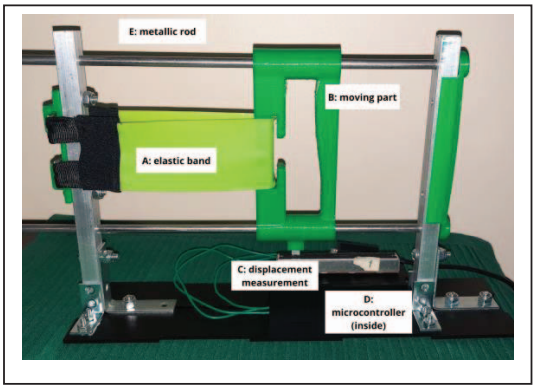


FIGURE 4. Prototype of the device.

printed moving part (B) is connected to the elastic band and has a slot to place the fingers. The moving part moves through two metallic rods (E) that serve as rails. The displacement is measured with a linear potentiometer (C) connected to the moving part. The microcontroller is connected to the potentiometer and placed under it. The device was tested multiple times with the different bands and it was easy to use and record data.

B. Elastic bands characterization.

The tests to characterize the elastic bands were performed as describe in the design approach section. The force (N)-deformation (mm) curves were obtained for each elastic with tensile strength machine. These curves are shown in Figure 5.

The tests in the elastic bands provided the force-deformation equations shown in Table 1. The tests showed that the bands have separate force ranges what makes them useful for the purpose intended here: to offer different levels of resistance for grip movement. Also, the maximum resistance than the device can offer is 57.6N (Table 1). This value is adequate for the first rehabilitation phase. The maximum gripping force that a patient can develop after 24 weeks of rehabilitation is around 120N [15]. Therefore, the force ranges available with this device fall in the corresponding values at the beginning of therapy for hand grip movement.

Table 1 shows the resulting equations for force-deformation for each band. These equations were programmed into the user interface.

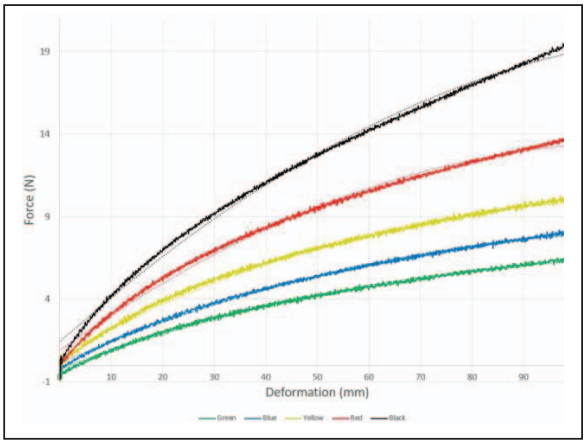


FIGURE 5. Force-deformation curves for the elastic bands.

TABLE 1. Force-deformation equation for the elastic bands.

Color	Force (N)	Maximum force (±0.05N)
Black	-0.004x^2+1.208x+5.5984	58.45
Red	-0.004x^2+0.892x+32.5736	42.65
Yellow	-0.0032x^2+0.6708x+2.5032	31.25
Blue	-0.0024x^2 +0.5355x+0.571	24.05
Green	-0.002x^2+0.4528x-0.7844	19.20

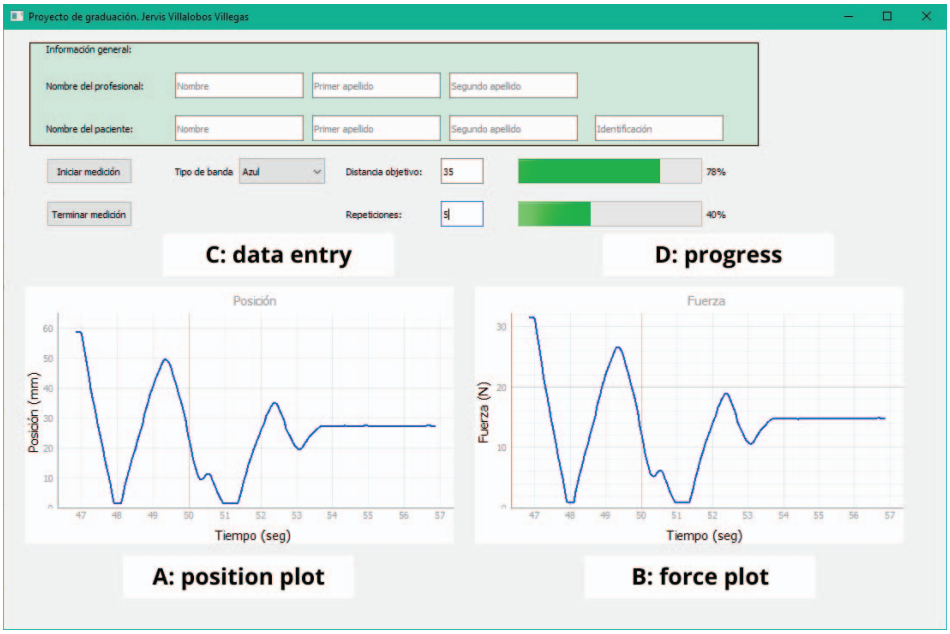


Figure 6. User interface.

C. *User interface.*

The figure 6 shows the user interface programmed. It has all functions described in design section. The two graphics in the lower half are the position (A) and force (B) real times graphics with the values read from the microcontroller. It also has a data entry section (C) to enter the patient's name and the parameters for the exercise. And progress section (D) with progress bars for the objective distance and number of iterations over the goal defined. The data saved by the program is saved into a excel when the exercised is finished.

IV. CONCLUSION

A functional design for hand grip function rehabilitation is presented. The prototyped build has been tested in healthy individuals and has been proved to be easy to use. The general mechanic design, the sensor and microcontroller selected have behaved as expected to perform hand grip exercise and data recollection from it. The device has shown to be able to register data from the exercise for further analysis.

This new device needs to be further validated with test subjects with real patients with hand movement limitations. Based on the device capabilities and other existing publications on therapeutic devices, the device could effectively aim in the rehabilitation of patients with limited hand movement.

The low cost and easy manufacturability of the device proposed make that it could potentially be implemented as a real therapeutic device in hospitals with low budget.

V. REFERENCES

[1] K. D. Bustamante Valles, D. Comaduran Marquez and M. J. Johnson, "Robotic Rehabilitation Therapy in Chihuahua Mexico, Challenges from Translating a Clinical Research Protocol to Clinical Practice," 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/LASCAS45839.2020.9068966.

[2] B. Coto-Solano, "Challenges in the incorporation of rehabilitation technology to public health in Costa Rica," 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/LASCAS45839.2020.9069033

[3] C. H. Hwang, J. W. Seong y D.-S. Son, "Individual finger synchronized robotassisted hand rehabilitation in subacute to chronic stroke: a prospective randomized clinical trial of efficacy", Clinical Rehabilitation, vol. 26, n.o 8, pags. 696-704, 2012. doi: 10.1177/0269215511431473

[4] Neofect Smart Glove. https://www.neofect.com/us/smart-glove.

[5] O. Lambercy, D. Schr¨oder, S. Zwicker y R. Gassert, "Design of a Thumb Exoskeleton for Hand Rehabilitation", en Proceedings of the 7th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology, ep. i-CREATe '13, Gyeonggi-do, South Korea: Singapore Therapeutic, Assistive Rehabilitative Technologies (START) Centre, 2013

[6] B. Wang, N. Takahashi y H. Koike, "Sensor Glove Implemented with Artificial Muscle Set for Hand Rehabilitation", in Proceedings of the Augmented Humans International Conference, AHs '20, Kaiserslautern, Germany: Association for Computing Machinery, 2020, ISBN: 9781450376037. doi: 10.1145/3384657.3384791.

[7] M. Chen, S. Ho, H. F. Zhou, P. M. Pang, X. Hu, D. Ng y K. Y. Tong, "Interactive rehabilitation robot for hand function training", in 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2009, 777-780. doi: 10.1109/ICORR. 2009.5209564.

[8] H. Hoffman, T. Sierro, N. Tianyi, M. E. Sarino, M. Sarrafzadeh, D. McArthur, V. R. Edgerton, D. C. Lu y T. Niu, "Rehabilitation of hand function after spinal cord injury using a novel handgrip device: a pilot study", Journal of NeuroEngineering Rehabilitation (JNER), vol. 14, n.o 1, p´ags. 1-7, 2017, issn: 17430003

[9] W. Park, W. Jeong, G.-H. Kwon, Y.-H. Kim, και L. Kim, 'A rehabilitation device to improve the hand grasp function of stroke patients using a patient-driven approach', 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013, σσ. 1–4.

[10] V. Valverde-Arredondo and A. Carrasquilla-Batista, "Haptic system for upper limb rehabilitation with hand grip strength measurements and Internet of Things capabilities," 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/LASCAS45839.2020.9069030.

[11] L. Rodríguez y K. Vargas, "Dimensiones antropométricas de las manos y su relación con la fuerza de agarre en una población administrativa de la Ciudad de Bogotá", Colombia)), pag. 41, 2019

[12] R. Srinivasan, W. Ruban, A. Deepanraj, R. Bhuvanesh y T. Bhuvanesh, "Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling", Materials Today: Proceedings, vol. 27, p´ags. 1838-1842, 2020, First International conference on Advanced Lightweight Materials and Structures, ISSN: 2214-7853. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.797

[13] G. M. Santos, G. Tavares, G. d. Gasperi y G. R. Bau, "Mechanical evaluation of the resistance of elastic bands", Brazilian Journal of Physical Therapy, vol. 13, pags. 521-526, 2009.

[14] ASTM International, “D412 16 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers Tension”, pags. 1-14, 2021.

[15] R. Stock, G. Thrane, T. Askim, A. Anke y P. J. Mork, “Development of grip strength during the first year after stroke”, 2019.

Fruit Detection and Classification Using Computer Vision Techniques

Víctor Zárate
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
victor.zarate@utp.ac.pa

Danilo Cáceres
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
danilo.caceres@utp.ac.pa

***Abstract*—Fruit detection and classification are very important processes that can lead to automation improvements in agricultural and logistical tasks and therefore lead to a better industrialization of this sector. It makes these tasks more efficient since they usually need a lot of human labor. In this paper an algorithm is developed for the detection and classification of fruits using image processing and computer vision techniques. This will be made using a coding software with no external libraries, this way the working mechanisms of the process can be better understood, making it a good educational resource for students that could be interested into learning computer vision.**

Keywords—classifier, object detection, computer vision

I. Introduction

Fruit detection and classification are very important processes that can lead to automation improvements in agricultural and logistical tasks and therefore lead to a better industrialization of this sector. It makes these tasks more efficient since they usually need a lot of human labor. One of the most important aspects of fruit recognition and classification is the sensing method. These methods can be divided in two distinguishing categories: invasive and noninvasive technologies. These sensing mechanisms also make it possible to determine the perceived and actual quality of the fruit. Some of the implemented mechanisms are:

1. Invasive:

- Sweetness sensors: This method involves quantifying the sugar content of the fruit, usually measured in brix. In some cases, they rely on dissolving solid parts of the fruit in samples effectively destroying the fruit. In other cases, microextraction methods can be implemented, however, these are not commercially available [1].
- PH and acidity: This method involves quantifying the concentration of hydrogen ions in a solution made from the fruit [1]. A measurement can also be made directly from the fruit, although piercing the fruit with the sensing device is required in this case.

2. Noninvasive:

- Weight sensors: These include simple scales which don't damage the fruit.
- Moisture sensors: These include magnetic resonance imaging, near infrared spectroscopy and hyper-spectral imaging [2].
- Electric noses: These examine the chemical composition of the volatiles that are produced by the fruit [3]. These can also detect Ethylene level, which is a key indicator of fruit ripening [4].
- Soft Tactile sensors: These sensors work by applying a very small force on the fruit, as to not destroy it, and sensing the fruits response [5].
- Computer Vision: These use the visual information of the fruit, to extract characteristics, and use an intelligent system to make decisions. As information science is rapidly growing, computer vision-based pattern recognition and image processing are matured techniques for safety and quality analysis of several agricultural applications [6].

Another important aspect of fruit recognition, classification and quality determination is the method implemented to process the information and characteristics observed by the sensors. In 2014, a method was proposed and tested consisting of a fruit classification algorithm which used merely a digital camera, this algorithm used feedforward neural network techniques [7]. A paper in 2012, just two years prior, proposed a method that used a support vector machine (SVM) classifier [8]. In 2015, a research paper made a review of the methods available at the time for the automatic classification and grading of quality of fruit using computer vision using mainly a camera as the sensing component [9]. Another paper with the same goal of reviewing the methods available at the time was also published in 2017, stating that one of the main quality features of fruits is its appearance, since it influences their market value, the preference and choices of the consumer, and can also be an indicator of the internal quality of the fruit. The scope of the sensing mechanisms was a bit broader in this paper, since it used other kind of sensor aside from a digital camera, like weighting machines, firmness tester, and aroma sensor [10]. Another paper like this was also published in 2021, where even more image acquisition techniques were mentioned, like ultrasound, infrared, and tomographic imaging. In this work, early defect detection was mentioned as an important task, but also a very challenging one due to the huge variation of defect types [6].

In this paper an algorithm is developed to detect and classify fruits using computer vision techniques. The goal of this paper is to introduce an algorithm that classifies fruit from a known subset of fruit types in a fast and computationally inexpensive way. In order to maintain it computationally inexpensive, a method consisting of only extracting the main color and circularity of the fruit was proposed. By keeping the computation cost low, this method is expected to be scalable

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00110

so that it can classify from a bigger subset of fruits and in some future for it to be able to detect fruit quality.

This algorithm will be implemented using the SciLab Software and without the use of any external libraries since the goal is to make this implementation as educational and reproducible as possible. The synopsis of the process is as follows:

1. Segmentation of the fruit: This eliminates insignificant information and brings focus on the important information, in this case being the fruit to be analyzed and classified.
2. Resolution downscaling: This is to make the process more manageable, since it reduces the amount of information that must be processed.
3. Color extraction: This is a required descriptor to classify the fruits.
4. Circularity extraction: This is a required descriptor to classify the fruits.
5. Classifier: This process identifies the fruit that is being analyzed based on the extracted descriptors (color and circularity), by comparing them with a given dataset in a probabilistic manner.

This paper begins by describing the materials and methods, a description of the concepts and theories behind of each necessary process for the detection and classification of the fruit is given. Then the results and observations are shown. In Fig. 1 a flowchart indicating the main processes and their relation is shown.

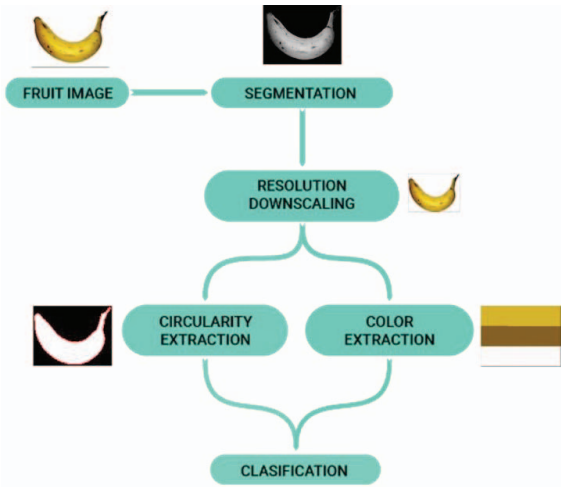


Fig. 1 Fruit detection and classification algorithm flowchart.

II. PROPOSED METHOD

Having established a process roadmap for this goal, this section focuses on explaining more in depth the concepts and theories that are needed to make each step of this flowchart possible.

A. Segmentation

The process starts by turning the image into grayscale, the goal of this is to make the distinction between fruit and background easier. Now, a threshold value can be chosen and check for each pixel if the intensity value is above or below the threshold. If it is above, then it is considered a background pixel (since it is assumed that all the fruit images have a white background). And if it is below that threshold value, then it is considered a fruit pixel.

Every pixel in the image have now been classified as either a background pixel or fruit pixel. The intensity value of all the background pixels is now set as 0 so the area that has been classified as background can be visualized and proceed to erase every column and row that is only composed of background pixels. This is to get rid of all the irrelevant information and basically "zoom" into the fruit.

B. Resolution Downscaling

To reduce the image size a "BOX" filter was used, this is a low pass separable filter with a box kernel, in which all the coefficients of this kernel have the same value (usually 1). A box filter is a fundamental filter in image processing [11]. Its name, Box Kernel, is derived from the fact that a constant kernel resembles a box when visualized in 3-D, several box filter techniques have been developed, as seen in [12], in this paper this filter will be used to downscale the fruit image. A "Box" filter is a matrix of ones, with a normalization constant, which value is 1 divided by the number of coefficients, 1/mn. This normalization applied to all the low pass nuclei has two purposes. First, the average intensity value of a constant intensity area would be equal to that same intensity. Secondly, normalizing the kernel this way avoids the introduction of a bias during filtering; that is, the sum of the intensity in the original image and the filtered image will be the same. Each pixel value in the output image is the arithmetic mean of the neighbor pixels of the reference pixel. The resulting kernel can be observed in (1):

$$M = \frac{1}{mn} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Now that the kernel is constructed, the image can now be divided in square boxes of pixels, the total amount of boxes will be the goal number of pixels. The kernel is now applied to every box, and the resulting intensity will be mapped as the intensity of that pixel in the resulting image.

C. Color Extraction

The method used to extract the color as to optimize the "precision/computational complexity" ratio in this case was a K-Means clustering method, this method has been implemented before for fast segmentation as seen in [13]. The first step is to map every single pixel color into a point in a 3D color space, where the three dimensions are the red, green, and blue intensity values.

Now, every one of these points are sorted into one of K clusters. Since one of the goals is to optimize the "precision/computational complexity", they will be grouped into 3 clusters. Since every fruit image has a main fruit color, a color for the secondary characteristics of the fruit, and a background color (white in this case). The sorting takes place in a way so that the mean of the distances between every point and the center of the corresponding cluster is minimum.

The algorithm to be used works in the following way:

1. First, the position of the center of the 3 clusters will be selected at random.

2. Each point will check which cluster center is closest and will now be classified as part of that cluster.
3. The position of the center of the 3 clusters will now be calculated using the positions of the points that are part of that cluster.
4. If any cluster has no points, then the position of its center will be located at random again.
5. Repeat steps 2 through 4 until convergence is achieved.

This algorithm will converge to a local minimum, the global minimum is not guaranteed. The results of the convergence will depend on the first random values that were used. Since 3 clusters were used for this algorithm, and since most of our images have 3 main colors, the local minimum achieved will be sufficient for our purposes. Now to demonstrate, the image of the pear that is 50 pixels by 39 pixels will be used as an example, in Fig. 2 the 3 main clusters that were found can be seen and in Fig. 3 their center and how they converged can be seen.

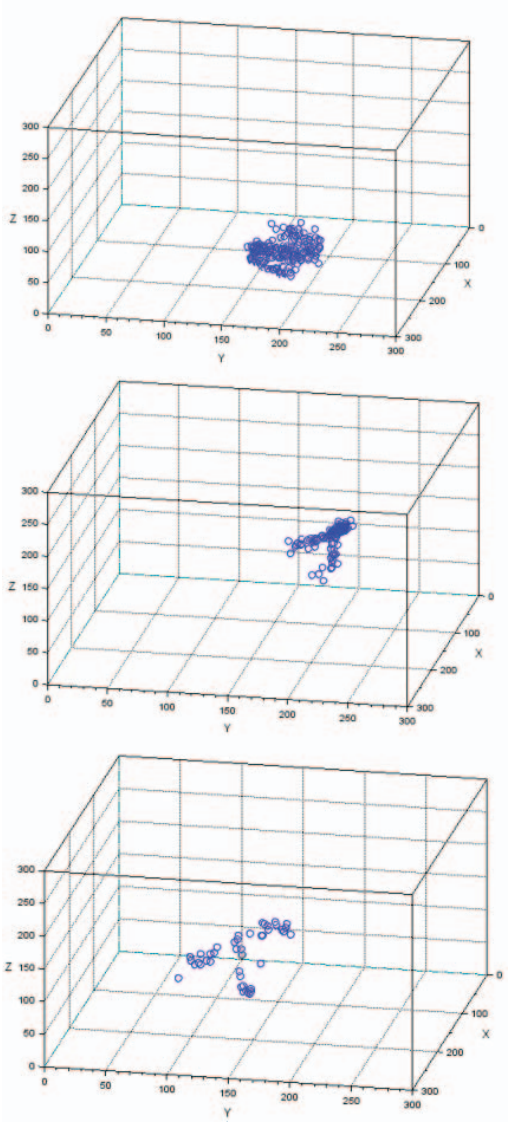


Fig. 2 The 3 main clusters that are found in the pear image.

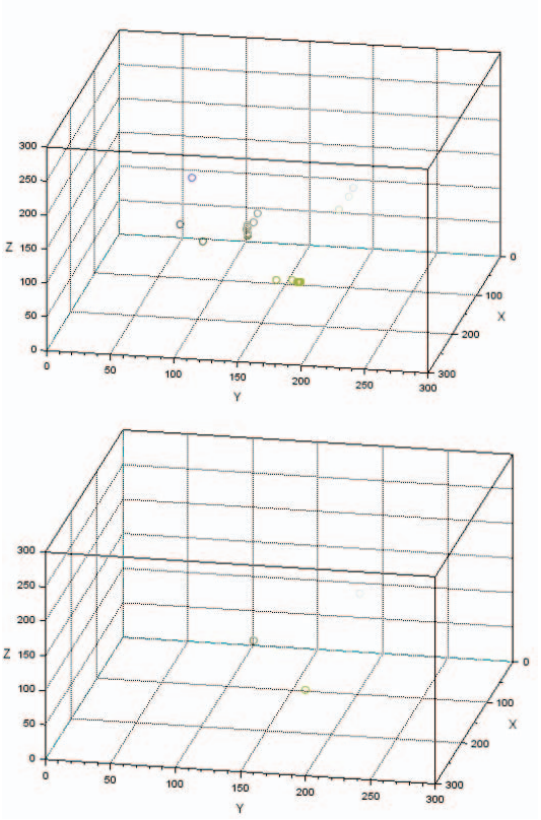


Fig. 3 The clusters means and how they converged.

The locations of the center of the 3 cluster have been obtained, representing the 3 main colors of the image. The one with the highest number of points in the cluster will now be extracted, except if the intensity is too high, because that would mean the white color of the white background was extracted, in this case this cluster will be ignored and extract the center of the next one.

The fruit color that was extracted is a 3-dimensional descriptor, and therefore, if the circularity was added, the feature space would be 4-dimensional. Since one goal is to optimize the "precision/computational complexity" a shift is needed to change the reference system to a more intuitive one, closer to how humans perceive color. The HSV reference system is now introduced.

The HSV reference system has 3 dimensions as well, those being Hue, Saturation and Value (or brightness). But it is important to point out that the saturation of the fruit could have different factors affecting it, so it could be sub optimal for this paper purposes. The same could be said for the brightness of the color.

However, hue is a characteristic that human beings can perceive instantly as soon as a classification is being made. So, that intuition is given to this algorithm as well.

That means a descriptor for color that has only one dimension has been obtained, hue.

D. Circularity Extraction

The method used to extract the circularity will start by using the following equation:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

Where C is the dimensionless circularity of the fruit, P is the perimeter of the fruit in pixels, and A is the area of the fruit in pixels squared.

Now, to obtain these parameters the resized image will be gray scaled and binarized using an intensity threshold.

Once the image is separated into fruit pixels and background pixels, by counting the amount of fruit pixels that there are, the fruit area.

To obtain the perimeter a Moore boundary tracing algorithm will be implemented, these algorithm uses the binarized image to trace the boundary of all the fruit pixels, while doing so, a Freeman Chain code algorithm can be used to store the direction of the movements being made while tracing the boundary. By summing up exactly how many times the trace moved horizontally and vertically and how many times it moved diagonally, if it now multiplies every horizontal and vertical movement by one, and all the diagonal movements by the square root of two and add all these lengths it will have as a result the perimeter of the fruit. Having computed the area and the perimeter a computation of the circularity can now be made. This Moore boundary tracing process can be visualized with an example in Fig. 4.

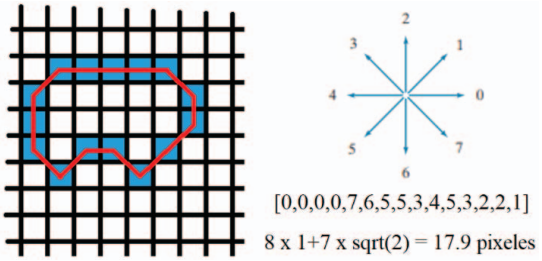


Fig. 4 Moore boundary tracing algorithm, paired with a freeman chain code, to compute the perimeter of the pixelated image.

Modified versions of Moore algorithms have been implemented recently as seen on [14].

E. Classifier

A simplified version of the naive bayes classifier will be implemented. The naive bayes classifier is a probability-based classifier that is based on applying Bayes' theorem with naïve independence assumptions between features [15]. such that:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (3)$$

In this example A is defined as the set of a fruit, and B as the set of descriptors (color or circularity) that could be defined by B=C ∩ F where C is the color set and F is the circularity set.

First, a set of already classified images of fruits is needed, then the features of this images will be extracted, those being their main color and circularity.

Now, they will be modeled as random variables and the mean and standard deviation for all the features of each fruit will be computed. This can be mapped into a 2-D plane in which one axes is the color and the other axes the circularity. A point for every single classified image can be mapped here. If a point without classification is positioned into this map, the means, and their standard deviation of the classified set of fruits can be used to classify that point into a specific fruit.

To simplify the naïve Bayes method, a Manhattan distance between the unclassified point and the means of the classified sets will be used. This Manhattan distance will be normalized to be in the units of standard deviations for each specific set. Then the distances between the unclassified point and all the means of the classified set will be compared and the set with the shortest Manhattan distance will be chosen as the set this point will be classified into. the new image is now classified as a fruit.

III. ALGORITHM DESCRIPTION AND IMPLEMENTATION

Now, equipped with a better understanding of the parts of the process and how they all relate, an executable computation for this procedure must be implemented, this will be the algorithm. The algorithm must be designed in a way that maximizes the accuracy of the classification while minimizing the computation power and computation time. This implementation will be made using the SciLab software without the use of external libraries, for educational and clarity purposes.

A. Algorithm Description

Since the goal is to be able to make this classification without the use of external libraries, a new library will be made from scratch. This library will contain, in an organized manner, all the necessary processes and algorithms that are needed to extract the features of the fruit in the image, and to classify them accordingly.

- grayFromRGB: This function's input is a colored image, and its output is the same image converted into grayscale.
- zeroFill: This function's input is a grayscale image, and Its output is the same image with an extra layer of zeroes.
- recortarAbove: this function's inputs are a colored image and an integer between 0 and 255; this integer will be the threshold, and its output is the same image but zoomed in without considering the background. The way it works is that it first converts it into grayscale, then completely removes any row or column that is entirely made up of intensities above the threshold. Then converts the smaller image back into a colored one.
- scalingTo: this function's input are a colored image and an integer; this integer will be the goal resolution. The way it works is that it lowers the resolution of the input image, without changing its scale, until the smallest axis is the closest possible integer value to the goal resolution. If the goal resolution is larger than the

smallest axis, then this function does nothing. Its output will be the lower resolution image, close to the goal resolution.

- kMeansColorsAbove: This function's input are a colored image and an integer; this integer will be the threshold. Its function is to identify the 3 main distinguishable colors in the image and to extract the most abundant one. If the color is converted into grayscale and its intensity value is above the threshold then that means it is the background color, and the color that will be extracted will be the second most abundant one. The color obtained is in RGB reference format and will be converted into HSV and the hue will be extracted. The output of this function is the hue in degrees.
- circularityAbove: this function's input are a colored image and an integer; this integer will be the threshold. First it converts the image into grayscale and then binarizes it, all the pixels with an intensity value above the threshold will be considered background pixels and the ones with intensity values below the threshold will be considered fruit pixels. With this binarized image of the fruit it now computes the perimeter and area of the fruit with the algorithms mentioned. Its purpose is to use the perimeter and area values to obtain the circularity of the fruit. The output of this function is the dimensionless circularity of the fruit.

B. Algorithm Implementation

The first step is to choose the types of fruits that the program will be able to categorize, for this implementation 7 different fruits were chosen, which were:

1. Apple
2. Pear
3. Orange
4. Banana
5. Green Lemon
6. Yellow Lemon
7. Pineapple

Subsequently, 10 images of each fruit were downloaded from the internet with the intention of obtaining the circularity and hue distribution for each one. To obtain this circularity and hue distribution, each fruit image went through a preprocessing that consisted in cutting out the white background and downscaling the resolution as close as possible to 64 pixels squared without distorting its aspect ratio. Then the circularity and hue are extracted. This process can be visualized in Fig. 5.

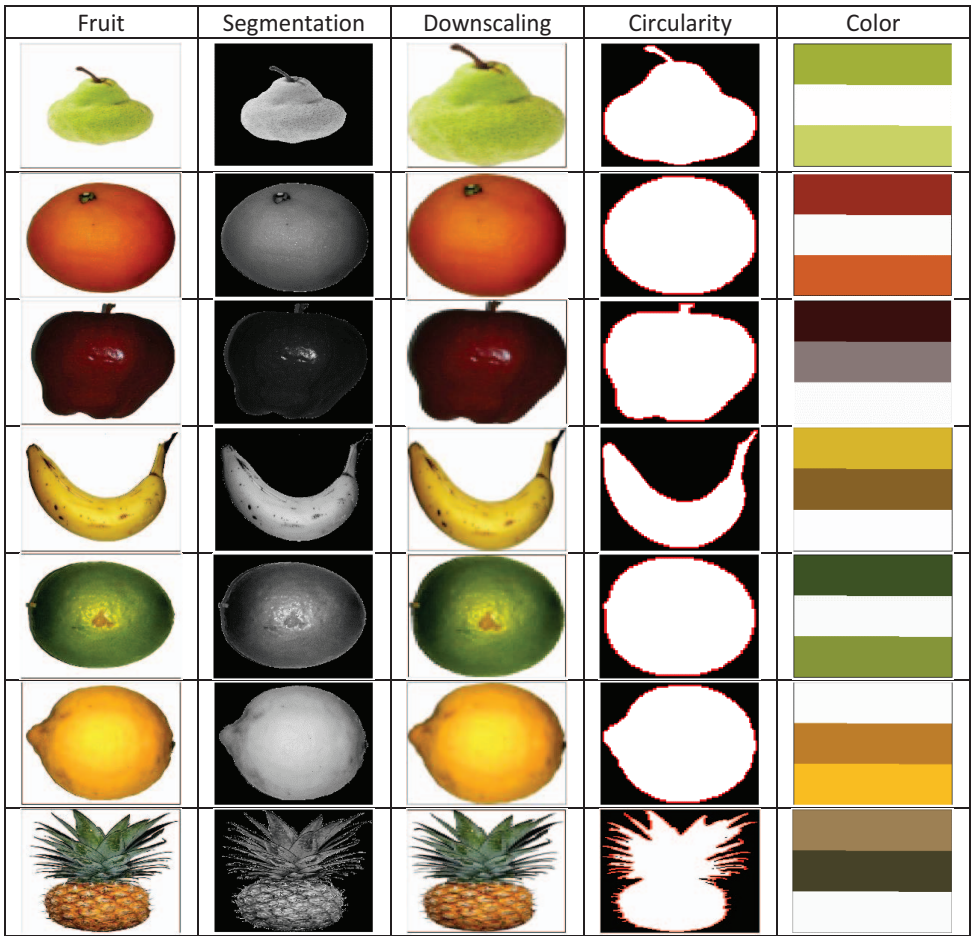


Fig. 5 Feature extraction process visualization

IV. ACHIEVED RESULTS

Once the implementation and debugging are carried out, the results of this algorithm with the given implementation parameters can be observed.

A. Feature Space

In Fig. 6 the hue and circularity distribution for each of the 7 different fruits can be observed, the X-axis being the circularity, and the Y-axis being the hue.

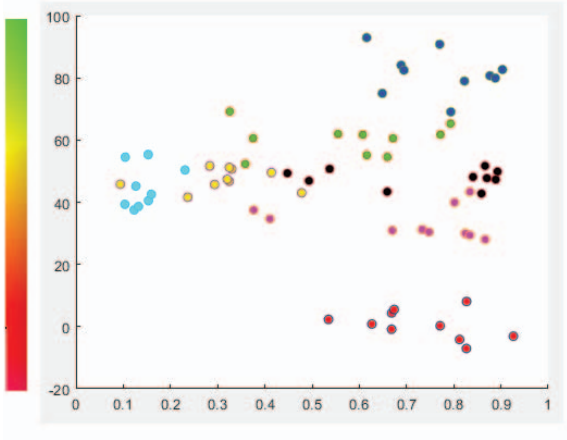


Fig. 6 Hue and circularity distribution for all the 7 fruits. The X-axis represents the circularity which is dimensionless. The Y-axis represents the hue in degrees.

The red dots are the apples, the green dots are the pears, the pink dots are the oranges, the yellow dots are the bananas, the cyan dots are the pineapples, the black dots are the yellow lemons, and the blue dots are the limes.

Next, in Fig. 7 the same distributions can be seen but without taking the pineapples and yellow lemons into account.

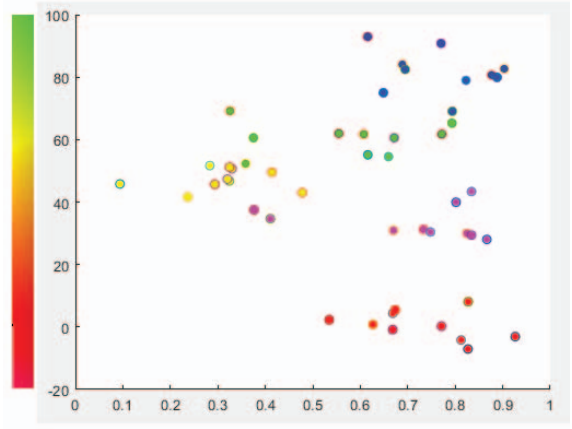


Fig. 7 Hue and circularity distribution for all the 7 fruits, except for the pineapple and yellow lemon. The X-axis represents the circularity which is dimensionless. The Y-axis represents the hue in degrees.

In Fig. 8 the classification range for all fruits can be observed:

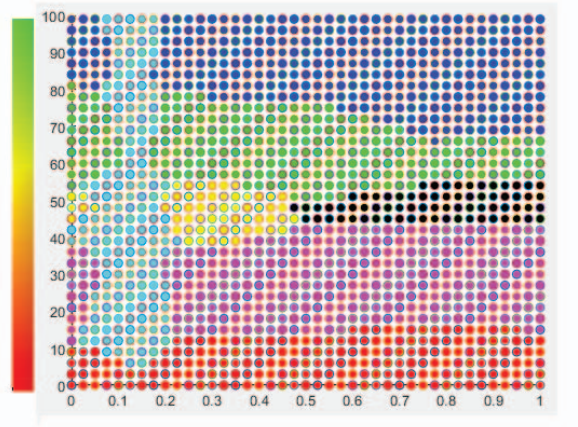


Fig. 8 Classification range for all fruits.

In Fig. 9 the classification range of fruits when neither the pineapples nor the yellow lemons are taken into consideration can be observed:

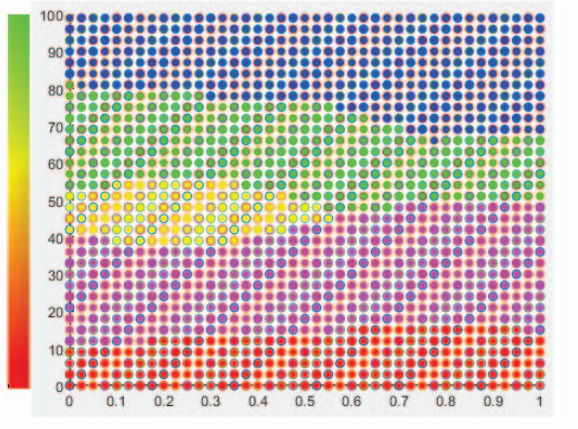


Fig. 9 Classification range for all fruits, except for pineapples and yellow lemons.

B. Classification

In order to test the program, the goal to classify 10 images of each fruit that are not part of the training dataset of the program was proposed. 5 images for each fruit are downloaded from the internet, and the other 5 images were taken with a cellphone camera and the fruit was placed in front of a white cardboard. In some of these images the brightness and contrast were adjusted to further accentuate the background.

Classifying all the 70 images took 1 hour and 35 minutes. In Table 1 the results of the classification for each of the 10 images of each fruit can be seen. And in Table 2 the confusion matrix for these results can be seen.

The confusion matrix, also known as the error matrix, is the table used for visualizing the performance of an algorithm and for calculation of various evaluation metrics. It provides an insight about the types of errors that are made by the classifier [16].

Table 1. Classification Metrics

Input Fruit	Metrics						
	TP	TN	FP	FN	Sensitivity	Specificity	F1-Score
Apple	9	60	0	1	0.9	1	0.947
Pear	10	59	1	0	1	0.983	0.952
Orange	10	56	4	0	1	0.933	0.833
Banana	9	59	1	1	0.9	0.983	0.9
G. Lemon	10	60	0	0	1	1	1
Y. Lemon	7	60	0	3	0.7	1	0.824
Pineapple	9	60	0	1	0.9	1	0.947

Table 2. Confusion Matrix

Results								
Input		Classification						
Quantity	Fruit	Apple	Pear	Orange	Banana	G. Lemon	Y. Lemon	Pineapple
10	Apple	9	0	1	0	0	0	0
10	Pear	0	10	0	0	0	0	0
10	Orange	0	0	10	0	0	0	0
10	Banana	0	1	0	9	0	0	0
10	G. Lemon	0	0	0	0	10	0	0
10	Y. Lemon	0	0	3	0	0	7	0
10	Pineapple	0	0	0	1	0	0	9

V. CONCLUSION

It can be observed in the feature space that the fruits have visible continuous regions in which they would classify an unknown point, this happens for both cases, when the pineapple and yellow lemon are considered, and when they are not.

Another observation is that the hue of the fruit is the most determining factor when the fruit is classified, this could be due to a lack of precision in the program when extracting the circularity, and because there are few cases where there are fruits with identical colors but contrasting circularities. However, this can be observed in the case for bananas and yellow lemons, where both coexist in a very narrow hue range, but are distinguishable mostly by their circularity.

One of the most time intensive parts of the project was the debugging process and making sure it ran in an optimal and accurate way. This required the improvement and optimization of various parameters, like the thresholds or the goal resolution. If these parameters were not optimal it would result in extended running times or even cases where the circularity could not be extracted, these cases will now be discussed.

Further modifications could be made to test and potentially optimize this algorithm, like changing the color extraction method, and by using Otsu's method for image thresholding.

In Fig. 10 it can be observed that the body of the yellow lemon is considered as a background pixel due to the lighting at the time the picture was taken.

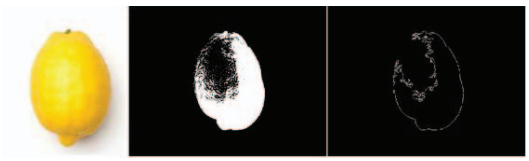


Fig. 10 Inaccuracy caused by the lighting of the yellow lemon.

In Fig. 11 it can be observed that the image has been split into more than one region, this causes the perimeter to be calculated only on the top region, due to the way the circularity algorithm works, this causes the circularity to have a wrong value, sometimes above one, which is impossible.

Fig. 11 Inaccuracy caused by the bright color of the banana.

In Fig. 12 the same case can be observed for the yellow lemon, however, in this case the repercussions are worse, given that the first region consists of only one pixel, this means the Moore boundary tracing algorithm gets stuck with no more pixels to trace, this causes the program to get stuck and completely freeze.

Fig. 12 Inaccuracy caused by the lighting in the yellow lemon.

REFERENCES

[1] D. Wilson, "Chemical Sensors for Farm-to-Table Monitoring of Fruit Quality", *Sensors*, vol. 21, no. 5, p. 1634, 2021, pp.1-29.

[2] A. Ren et al., "Machine Learning Driven Approach Towards the Quality Assessment of Fresh Fruits Using Non-Invasive Sensing", *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 4, 2020, pp. 2075-2083.

[3] M. Baietto and A. Wilson, "Electronic-Nose Applications for Fruit Identification, Ripeness and Quality Grading", *Sensors*, vol. 15, no. 1, 2015, pp. 899-931.

[4] S. Benedetti, S. Buratti, A. Spinardi, S. Mannino and I. Mignani, "Electronic nose as a non-destructive tool to characterise peach cultivars and to monitor their ripening stage during shelf-life", *Postharvest Biology and Technology*, vol. 47, no. 2, 2008, pp. 181-188.

[5] P. Ribeiro, S. Cardoso, A. Bernardino and L. Jamone, "Fruit quality control by surface analysis using a bio-inspired soft tactile sensor", *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 8875-8881.

[6] B. Anuja and A. Bansal, "Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: a review," J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci. 33, 2021, pp.243-257.

[7] Z. Yudong, S. Wang, G. Ji and P. Phillips, “Fruit classification using computer vision and feedforward neural network,” Journal of Food Engineering 143, 2014, pp.167-177.

[8] Z. Yudong and L. Wu, “Classification of Fruits Using Computer Vision and a Multiclass Support Vector Machine,” Sensors (Basel, Switzerland) 12, 2012, pp.12489 - 12505.

[9] Seema, A. Kumar and G. S. Gill, “Automatic Fruit Grading and Classification System Using Computer Vision: A Review,” Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering, 2015, pp.598-603.

[10] S. Naik and B. Patel, “Machine vision based fruit classification and grading - a review,” International Journal of Computer Applications 170, 2017, pp.22-34.

[11] Y. Gong, B. Liu, X. Hou and G. Qiu, "Sub-window Box Filter," 2018 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP), 2018, pp. 1-4.

[12] M. J. McDonnell, “Box-filtering techniques,” Computer Graphics and Image Processing, vol. 17, no. 1, 1981, pp. 65–70.

[13] T. -W. Chen, Y. -L. Chen, and S. -Y. Chien, “Fast image segmentation based on K-Means clustering with histograms in HSV color space,” IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing, 2008, pp.322-325.

[14] S. Biswas, and R. Hazra, “Robust Edge Detection Based on Modified Moore- Neighbor,” Optik, 2018, 168, 931-943.

[15] F. -J. Yang, "An Implementation of Naive Bayes Classifier," 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 2018, pp. 301-306.

[16] D.R. Sarvamangala, R. V. Kulkarni, “Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey,” Evol. Intel. 15, 2022, pp.1–22.

Heartbeat Classification using Energy Percentage Distribution with Wavelet Transform and PCA

Carlos Boya-Lara
Research Directorate
Grupo de Investigación en Ingeniería y Nuevas Tecnologías aplicadas (GRINTEC)
Universidad Interamericana de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
carlos.boya@uip.pa

Omar Rivera-Caballero
Grupo de Investigación en Ingeniería y Nuevas Tecnologías aplicadas (GRINTEC)
Universidad Interamericana de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
omar.rivera@ieee.org

***Abstract*—This work proposes a new feature extraction method to improve heartbeat classification for arrhythmia detection. The method is based on the Energy Percentage Distribution (EPD) obtained with Wavelet Transform (WT) and Wavelet Packet Transform (WPT) of ECG signals. The EPD is obtained by calculating the percentage ratio of the energy of each decomposition level to the total energy of the signal. Using this feature extraction scheme various feature spaces are studied using Principal Component Analysis (PCA) and used to classify five types of beats from the MIT-BIH database with six classifiers: DT, Ensemble, ANN, SVM, kNN, and NB. The results are compared with a traditional feature extraction technique based on Independent Component Analysis (ICA). EPD using WPT in conjunction with PCA generally offered the best performance compared to ICA and EPD with WT.**

Keywords—ECG, Wavelet Transform, Wavelet Packet Transform, PCA, ICA, heartbeat classification

I. Introduction

Cardiovascular diseases are among the main causes of death in the world, and in turn, deteriorate the health and quality of life of human beings [1]. Among the great categories of these cardiovascular diseases are arrhythmias, which is a condition where the electrical activity of the heart is irregular, faster, or slower than its normal rhythm [2]. They can be classified into two broad categories; the first, where the arrhythmias are formed by a simple irregular heartbeat, is called morphological arrhythmia. And the other category is a set of irregular beats, which is called rhythmic arrhythmias [3]. The electrocardiogram (ECG) is a fundamental tool for the analysis and detection of arrhythmias, which consists of a test that records the electrical activity of the heart. It can provide very precise information on arrhythmias, which supports the diagnosis of an abnormal situation [4]. However, manual detection and classification by physicians could face some challenges due to the presence of noise, irregular heartbeats, different morphology of the same type of heartbeat among patients, or human error due to fatigue. This can lead to misdiagnosis and incomplete detection [5]. An alternative is the development and implementation of automatic monitoring systems as support. In general, these systems are divided into four stages: ECG signal preprocessing, heartbeat segmentation, feature extraction, and classification [3].

In this work, we focus on feature extraction stage. Feature extraction consist of using a set of features extracted from the ECG signals, such as RR intervals, which are time segments defined by two points between successive beats; or, morphological characteristics of the ECG pulses, which are extracted from the shape of these pulses, such as the QRS complex and the T and P waves. These last ones support the classification of the AAMI standard (Advancement of Medical Instrumentation) and that describe the most important types of heartbeat: Normal beat (N), Supraventricular ectopic beat (S), Ventricular ectopic beat (V), Fusion beat (F) and Unknown beat (Q) [6].

In the literature, the main characteristic used are the RR intervals, where their changes are correlated with the morphology of the ECG pulse, which is frequently caused by arrhythmias [7]. Also, the ECG curve with all its points is usually used as a characteristic. However, using all the points of the curve can generate a very high-dimensional vector that becomes intractable with computational methods since it requires a lot of resources and computation time. In this way, several techniques have been proposed to reduce the dimensionality without losing representativeness such as Principal Component Analysis (PCA) [8] or Independent Component Analysis (ICA) [9]. The former, in addition to reducing dimensionality, demonstrates a significant noise reduction, and ICA performs better extracting features. On the other hand, frequency-based techniques are very popular for ECG feature extraction. One of the most used is those based on Wavelet Transformer (WT) since they can distinguish non-stationary events both in time and in frequency (scale) [10]. ECGs are intrinsically non-stationary signals, at different scales or frequencies, and WT is a tool that supports the analysis of these signals [11]. With WT it is possible to reduce the feature space to a few values per ECG signal, maintaining representativeness and enabling discrimination between different types of arrhythmias [12]. In addition to WT, Wavelet Packet Transform (WPT) has been used, which is a more granular decomposition than WT, offering greater frequency resolution [13]. Moreover, PCA or other techniques are applied after WT or WPT to further reduce the number of features seeking noise reduction, better feature selection, and optimization of resources and computing time [14]. Once a set of optimal characteristics for the ECG signals has been chosen,

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00111

such that they allow their discrimination into different classes, the next stage is the classification. For this task, learning algorithms are used, such as Artificial Neural Networks (ANN) [15], Support Vector Machines (SVM) [9], k Nearest Neighbor (kNN)[16], decision tree (DT) [17], Ensemble [18], and Bayesian classifiers [19].

In this work, we propose to use the Energy Percentage Distribution (EPD) of the ECG signals obtained from the WT as a feature before classification. This distribution is obtained by calculating the energy of each decomposition level concerning the total energy of the signal. Also, we analyze this distribution obtained from the WPT. Subsequently, we apply PCA to decrease characteristics and then, we analyze the effect of using this feature extraction technique in six classifiers: DT, Ensemble, ANN, SVM, kNN, and Naive Bayesian (NB). The goal of applying (EPD) with PCA is to reduce the number of features and thus reduce resources and computation time. We compare the proposed method with the ICA feature extraction technique and use the MIT-BIH database to validate it, one of the most representative arrhythmia databases used for these research topic [20].

II. METHODOLOGY

In this section, we explain the techniques we use for the proposal and the complete process for feature extraction.

A. Energy percentage distribution with WT

EPD uses the WT for its conformation. The WT is a linear transform that decomposes a signal into components that appear at different scales. These scales are like an approximate inverse version of the frequency bands that make up the signal and are known as decomposition levels. With WT, the signal is decomposed into its low- (i.e., approximation) and high-frequency (i.e., detail) components. Each component is composed of coefficients that represent the correlation between a wavelet (scaled and shifted versions of a mother wavelet) with respect to the signal of interest. A mother wavelet is a function that has zero mean and is localized in both time and frequency space. Time localization of the spectral components can be obtained by wavelet analysis, as this provides the time-frequency representation of the signal [10]. This property makes WTs an effective tool for the analysis of ECG signals and for frequency-based feature extraction, with its powerful time-frequency localization property [11]. Fig. 1 shows the WT process for three levels of decomposition. At each level, the result is detail coefficients that capture the high frequencies and approximation coefficients, composed of the low frequencies of the signal. Depending on the level of decomposition i, the result is a vector with the approximation coefficients of the last level, and all the details obtained from each decomposition.

In this work we adapt the proposal presented in [21], in which the energy and energy percentage are calculated for each level of decomposition. Namely,

$$Ed_i = \sum_{n=1}^{N} d_i^2(n) \qquad (1)$$

$$Er_i = \frac{Ed_i}{E_d} x100\% \qquad (2)$$

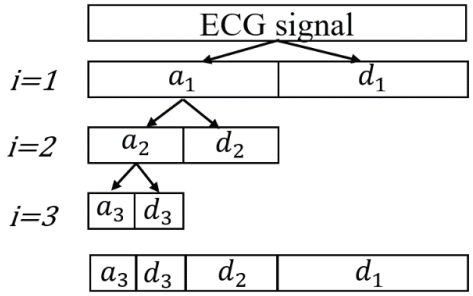


Fig. 1. The structure of Wavelet decomposition. a_i represent the approximation coefficients and d_i the detail coefficients at the i decomposition level.

where Ed_i is the energy of the detail coefficients at the i level, N is the total of coefficients for the level i, n is the sample index of coefficients, Ed is the total energy of all details denoted as $Ed = \sum_{j=1}^{L} Ed_i$, where L is the last decomposition level. Er_i is the percentage of energy corresponding to each detail i. In this work, instead of calculating the ratio of the energy per level to the total energy of all levels, we obtain the percentage of the energy of each level to the total energy of the signal, and we also add the energy of the approximation. With this strategy it is possible to obtain a total energy distribution of the signal with respect to the complete decomposition, considering the details and the approximation. With this change the distribution is obtained as follows:

$$Ed_{ip} = \frac{\sum_{n=1}^{N} d_i^2(n)}{E_p} 100\% \qquad (4)$$

$$Ea_p = \frac{\sum_{n=1}^{N} a_L^2(n)}{E_p} 100\% \qquad (5)$$

where Ed_{ip} is the percentage of the energy of the coefficients of details d_i at the i level for each ECG signal p, with $p = 1,2, \dots, M$ signals, and Ea_p is the percentage of the energy of the approximation coefficients a_L at the last level L of decomposition for each ECG signal p, and E_p is the total energy of the details and the approximation coefficients:

$$E_p = \sum_{i=1}^{L} \sum_{n=1}^{N} d_i^2(n) + \sum_{n=1}^{N} a_L^2(n) \qquad (3)$$

The wavelet energy distribution is used to form a wavelet energy vector as follows:

$$\boldsymbol{EW}_p = [Ea_p \; \boldsymbol{Ed}_p] \qquad (5)$$

where $\boldsymbol{Ed}_p$ is a vector with the percentage energy distribution for all l details, which are ordered from $L, L-1, \dots 1$. This vector is of size $L+1$. Example: If the maximum

decomposition level is 3, the vector for each ECG signal p would be: $\boldsymbol{EW}_p = [Ea_{3p}\, Ed_{3p}\, Ed_{2p}\, Ed_{1p}]$. In this way, the wavelet energy distribution is ordered with the percentage of energy from the lowest frequency at the initial position of the vector to the highest frequencies at the last position.

B. Wavelet Packet Transform

The WPT breaks down more finely than that done by the WT [22]. Figure 2 shows this process for three levels. As can be seen, for the subsequent level of decomposition, not only the approximation is used, but also the detail. The result is a higher frequency resolution of the signal. To obtain the percentage energy distribution, the equations are used in (4) and (5), resulting in the vector described in (5).

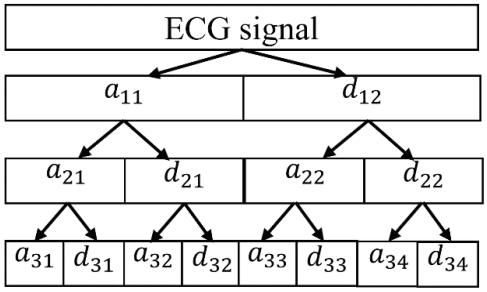


Fig. 2. The structure of Wavelet packet decomposition.

C. Principal Component Analysis

PCA seeks the most optimal linear combination of decorrelated variables, called principal components (PC), from original signals with zero mean while retaining as much information as possible from these latter signals. One of the tasks for which PCA is used is the reduction of dimensionality [11]. In this work, we apply PCA to the $\boldsymbol{EW}$ matrix formed by all the wavelet energy percentage distributions of each signal, in such a way that the $\boldsymbol{EW}$ matrix is of size $M(l+1)$. PCA is applied to $\boldsymbol{EW}$ resulting in two matrices:

$\mathbf{V} = [\mathbf{v_1}, \mathbf{v_2}, \dots, \mathbf{v_l}] \in \mathbb{R}^{lxl}$ is the corresponding orthogonal or unitary matrix consisting of the unit length eigenvectors.

$\boldsymbol{\Lambda} = diag\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l\}$ is a diagonal matrix containing the l eigenvalues.

In PCA, the eigenvectors are ordered from highest to lowest eigenvalue, such that, $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_l$, and in this way the first PCs point to the maximum variance or energy of the $\boldsymbol{EW}$ matrix. The dimensionality reduction is carried out by discarding eigenvectors, using as reference the percentage of energy contribution of each PC. In general, the first PCs are held using a power percentage threshold, which is typically between 90% to 95%. In this way, **EW** is projected only on the first PCs:

$$\boldsymbol{EW_{pc}} = \boldsymbol{V_q^T EW}$$

where $\boldsymbol{V_q}$ with q most relevant PCs.

D. Energy percentage distribution for ECG feature extraction

In this section we summarize the proposed method:

- Obtain the percentage power distribution for each ECG signal with equations (3) and (4) and generate the $\boldsymbol{EW}_p$ vector using equation (5).
- Form the matrix **EW.**
- Apply PCA to the **EW** matrix and reduce characteristics by retaining the most relevant PCs, $\boldsymbol{EW_{pc}}$.
- Use $\boldsymbol{EW_{pc}}$ as input to the chosen classification algorithm to discriminate between different types of the heartbeat.

III. Experimental Results

In this section, we performed the proposed method for different types of heartbeats and use six classification algorithms: DT, Ensemble, ANN, SVM, kNN, and NB. Four types of energy distributions will be used from WT and WPT and a conventional one for comparative purposes:

- The EPD from WT at the selected level for each ECG signal (EW).
- The EPD from the WT reduced to two PCs (EWPC2).
- The EPD from the WT reduced to three PCs (EWPC3).
- The EPD from the WPT reduced to four PCs (EPWPC4).
- Feature from Independent Component Analysis (ICA) with 10 Independent Components (ICs)[9].

This latest ICA extraction feature is a conventional and widely used method and is introduced to compare the results with the proposed method.

A. MIT-BIH database

In this work, we use the MIT-BIH database. This includes 48 parts that contain two-channel ECG recordings. Those parts were recorded between 1975 and 1979 at Boston's Beth Israel Hospital (now the Beth Israel Deaconess Medical Center) and obtained from 47 persons. Each part has a duration of half an hour. The persons were 25 men and 22 women. The men were 32–89 years of age, and the women were 23–89 years of age. The sampling is 360 samples per second, and the resolution for digitization is 11 bits over a 10-mV range [20]. From this database are used for this work, 17,500 heartbeat ECGs divided into Normal (5600) and 11,900 abnormal (Right Bundle Branch Block (RBBB), Left Bundle Branch Block (LBBB), Atrial Premature Contraction (APC), and Ventricular Premature Contraction (VPC)). The table shows the amount of each type.

Table 1. The number of ECG signals for each type of heartbeat.

Heartbeat type		Quantity
Normal		5600
Abnormal	*RBBB*	4000
	LBBB	4000
	APC	2100
	VPC	1800

B. Classification

Each ECG signal was processed by the method described in section D of the methodology. As the mother wavelet for the WT, the Daubechies wavelet two (Db2) with 5 levels of decomposition was used, following the recommendation of the work published in[13] which it was found that this is the mother wavelet and the level that offers the best results. For the case of WPT, the Maximal Overlap Discrete Wavelet Packet Transform (MODWPT) was used [22]. The classification process was as follows: The total number of signals was divided into a training set (90%) and a test set (10%). With the training data, the most optimal hyperparameters were searched for the six classifiers (DT, NB, SVM, kNN, Ensemble, and ANN) using Bayesian optimization with 5-folds cross-validation.

The performances of the classifiers are evaluated in terms of sensitivity, specificity, and accuracy. Sensitivity (true positive rate) refers to the probability of a positive test, conditioned on truly being positive. Specificity (true negative rate), to the probability of a negative test, conditioned on truly being negative; and accuracy is the proportion of correct predictions[13]:

$$SE\ (sensitivity) = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$SP\ (specificity) = \frac{TN}{TN + FP}$$

$$Acc\ (accuracy) = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

where true positives (TPs), false positives (FPs), false negatives (FNs), and true negatives (TNs). The feature extraction algorithm was programmed in MATLAB, as well as the algorithms for classification. For the implementation and running of the algorithms, a computer with an Intel(R) Core (TM) i7-10870H CPU @ 2.20GHz and 32.0 GB RAM was used.

Table 2 shows the results for the six classifiers with the proposed method. These results are using the test data. It is observed that EPWPC4 achieves the best results for DT, NB, SVM, and ENSEMBLE classifiers. On the other hand, for kNN and ANN, the feature extraction technique ICA was the one that presented the best performance. However, EPWPC4 presents values very close to ICA for these two classifiers. EW, which is the distribution of energy with WT, presents the best values of Acc than when PCA is used. Also, it is notable that in general, as more PCs are used, the performance of the classifiers improves.

TABLE 2. RESULT OF THE SIX CLASSIFIERS WITH THE PROPOSED METHOD. THE BEST RESULT IS HIGHLIGHTED IN RED.

Classifier		Feature Extraction technique				
		ICA	*EW*	*EWPC2*	*EWPC3*	*EPWPC4*
DT	*SE*	0.922	0.937	0.868	0.896	**0.966**
	SP	0.981	0.983	0.961	0.972	**0.991**
	ACC	0.926	0.937	0.853	0.893	**0.967**
NB	*SE*	0.522	0.735	0.721	0.715	**0.887**
	SP	0.873	0.921	0.917	0.921	**0.969**
	ACC	0.498	0.701	0.694	0.707	**0.881**
SVM	*SE*	0.904	0.955	0.903	0.907	**0.978**
	SP	0.972	0.989	0.972	0.975	**0.994**
	ACC	0.882	0.959	0.891	0.904	**0.978**
kNN	*SE*	0.975	0.952	0.891	0.921	**0.976**
	SP	**0.994**	0.987	0.967	0.978	**0.994**
	ACC	**0.978**	0.951	0.875	0.915	0.976
ANN	*SE*	0.998	0.969	0.898	0.926	**0.978**
	SP	**1.000**	0.993	0.970	0.979	0.994
	ACC	**0.998**	0.973	0.885	0.918	0.979
ENSEMBLE	*SE*	0.972	0.962	0.892	0.926	**0.975**
	SP	**0.994**	0.990	0.968	0.979	**0.994**
	ACC	0.975	0.961	0.879	0.918	**0.977**

IV. CONCLUSIONS

In this work, a new feature extraction method has been proposed to improve heartbeat classification for arrhythmia detection. The method is based on obtaining the EPD of the ECG signals with WT and WPT. The EPD is obtained by calculating the percentage ratio of the energy of each decomposition level with respect to the total energy of the signal. Using this feature extraction scheme various feature spaces are studied using Principal Component Analysis (PCA). The features are used to classify five heartbeat types from the MIT-BIH database with six classifiers: DT, Ensemble, ANN, SVM, kNN, and NB.

WT is used to generate EPD. Then, EPD combined with PCA is implemented to obtain features with two and three principal components. Finally, WPT with PCA is used to obtain EPD and with PCA, reduce the feature space to four principal components. Each of these EPDs was applied to the six classifiers to evaluate their performance. In addition, the results were compared with a traditional feature extraction technique based on ICA. In general, the EPD using WPT in conjunction with PCA was the one that gave the best results. Also, it was observed that an increase in the characteristics with PCA, improved the results. ICA was superior with kNN and ANN to the best technique based on percentage distribution of energy, however, the one based on WPT resulted in a very close performance.

REFERENCES

[1] S. Kaptoge *et al.*, "World Health Organization cardiovascular disease risk charts: revised models to estimate risk in 21 global regions," *The Lancet Global Health*, vol. 7, no. 10, pp. e1332–e1345, Oct. 2019, doi: 10.1016/S2214-109X(19)30318-3/ATTACHMENT/0BB4F97C-D682-49B9-9D58-A16B58C87155/MMC2.PDF.

[2] "Heart Rhythm Disorders | UpBeat.org - powered by the Heart Rhythm Society." https://upbeat.org/heart-rhythm-disorders (accessed Jul. 23, 2022).

[3] E. J. da S. Luz, W. R. Schwartz, G. Cámara-Chávez, and D. Menotti, "ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection: A survey," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 127, pp. 144–164, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.CMPB.2015.12.008.

[4] R. C. H. Chang, C. H. Lin, M. F. Wei, K. H. Lin, and S. R. Chen, "High-Precision Real-Time Premature Ventricular Contraction (PVC) Detection System Based on Wavelet Transform," *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 77, no. 3, pp. 289–296, Oct. 2014, doi: 10.1007/S11265-013-0823-6/FIGURES/10.

[5] A. Goldberger, "Clinical Electrocardiography: A Simplified Approach: Seventh Edition," *Clinical Electrocardiography: A Simplified Approach:*

Seventh Edition, pp. 1–337, 2006, doi: 10.1016/B0-323-04038-1/X5001-X.

[6] P. de Chazal, M. O'Dwyer, and R. B. Reilly, "Automatic classification of heartbeats using ECG morphology and heartbeat interval features," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 7, pp. 1196–1206, 2004, doi: 10.1109/TBME.2004.827359.

[7] F. Azuaje, G. Clifford, and P. McSharry, *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*. Artech, 2006.

[8] R. Ceylan and Y. Özbay, "Comparison of FCM, PCA and WT techniques for classification ECG arrhythmias using artificial neural network," *Expert Systems with Applications*, vol. 33, no. 2, pp. 286–295, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.ESWA.2006.05.014.

[9] S. N. Yu and K. T. Chou, "Selection of significant independent components for ECG beat classification," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2 PART 1, pp. 2088–2096, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.12.016.

[10] C. Torrence and G. P. Compo, "Practical Guide Wavelet Analysis," *Bulletin of the American Meteorological society*, vol. 79, no. 1, pp. 61–78, 1998.

[11] S. Kaplan Berkaya, A. K. Uysal, E. Sora Gunal, S. Ergin, S. Gunal, and M. B. Gulmezoglu, "A survey on ECG analysis," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 43, pp. 216–235, 2018, doi: 10.1016/j.bspc.2018.03.003.

[12] A. H. Khandoker, M. Palaniswami, and C. K. Karmakar, "Support vector machines for automated recognition of obstructive sleep apnea syndrome from ECG recordings," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13, no. 1, pp. 37–48, 2009, doi: 10.1109/TITB.2008.2004495.

[13] M. Thomas, M. K. Das, and S. Ari, "Automatic ECG arrhythmia classification using dual tree complex wavelet based features," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, no. 4, pp. 715–721, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.AEUE.2014.12.013.

[14] R. J. Martis, U. R. Acharya, and L. C. Min, "ECG beat classification using PCA, LDA, ICA and Discrete Wavelet Transform," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 8, no. 5, pp. 437–448, 2013, doi: 10.1016/j.bspc.2013.01.005.

[15] F. A. Elhaj, N. Salim, A. R. Harris, T. T. Swee, and T. Ahmed, "Arrhythmia recognition and classification using combined linear and nonlinear features of ECG signals," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 127, pp. 52–63, 2016, doi: 10.1016/j.cmpb.2015.12.024.

[16] Y. Kutlu and D. Kuntalp, "Feature extraction for ECG heartbeats using higher order statistics of WPD coefficients," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 105, no. 3, pp. 257–267, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.CMPB.2011.10.002.

[17] J. Fayn, "A classification tree approach for cardiac ischemia detection using spatiotemporal information from three standard ECG leads," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 1, pp. 95–102, Jan. 2011, doi: 10.1109/TBME.2010.2071872.

[18] M. Seera, C. P. Lim, W. S. Liew, E. Lim, and C. K. Loo, "Classification of electrocardiogram and auscultatory blood pressure signals using machine learning models," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 7, pp. 3643–3652, May 2015, doi: 10.1016/J.ESWA.2014.12.023.

[19] R. J. Martis, U. R. Acharya, H. Prasad, C. K. Chua, and C. M. Lim, "Automated detection of atrial fibrillation using Bayesian paradigm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 54, pp. 269–275, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.KNOSYS.2013.09.016.

[20] G. B. Moody and R. G. Mark, "The impact of the MIT-BIH arrhythmia database," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 45–50, 2001, doi: 10.1109/51.932724.

[21] M. S. Manikandan and S. Dandapat, "Wavelet energy based diagnostic distortion measure for ECG," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 2, no. 2, pp. 80–96, 2007, doi: 10.1016/j.bspc.2007.05.001.

[22] W. Ting, Y. Guo-zheng, Y. Bang-hua, and S. Hong, "EEG feature extraction based on wavelet packet decomposition for brain computer interface," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 41, no. 6, pp. 618–625, 2008, doi: 10.1016/j.measurement.2007.07.007.

Implementation of a robotic assistant to develop and monitor learning activities in children with autism.

Implementación de un asistente robótico para desarrollar y monitorizar actividades de aprendizaje en niños con trastorno del espectro autista (TEA).

Nakediryai Martínez
Universidad Tecnologica de Panamá
Panamá
nakediryai.martinez@utp.ac.pa

Víctor López Cabrera
Universidad Tecnologica de Panamá
Panamá
victor.lopez@utp.ac.pa

Jordi Albo-Canals
Lighthouse DIG
United States
jalboc@gmail.com

Olga Sans
Universidad Politécnica de Cataluña
Panamá
olga.sansc@upc.edu

Lydia Toppin
Universidad Tecnologica de Panamá
Panamá
lydia.toppin@utp.ac.pa

***Abstract*— Hookie is a social robot, which has been successfully used in therapy sessions with children with high-functioning ASD in the social and educational field at the Sant Joan de Déu Hospital, Barcelona. Currently in Panama, the Ann Sullivan Center of Panama (CASPAN), the Technological University of Panama (UTP) and Tufts University in Boston are collaborating in an exploratory study with the Hookie Robotic Platform in CASPAN classrooms. General methodology: 1) Interviews were conducted with specialists about the current needs of CASPAN in the classrooms. 2) The institution chose students in the range of 3 to 11 years old who fit the criteria to be evaluated on their interaction with the Hookie robot. 3) With the direction of the specialist, the robot was incorporated into the classroom as another student. 4) It was observed in which objectives could support the robot and allow the evaluation of the student-robot. 5) The actions of the robot were modified and adjusted to coincide or not with the student's objectives. Result: 1) Good acceptance on the part of the specialists in the use of Hookie. 2) Registration of new interactions on the part of certain students that previously did not respond with the other robots that reside in CASPAN.**

Keywords*— *Social Robotics, Autism Spectrum Disorder, Learning, Robot, Robotic Assistant, Education, Social Skills.

***Resumen* — Hookie es un robot social, la cual ha sido utilizado en sesiones de terapia con niños con alta funcionalidad de TEA en el campo social y educativo de manera exitosa en el hospital Sant Joan de Déu, Barcelona. Actualmente en Panamá el Centro Ann Sullivan de Panamá (CASPAN), la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y La Universidad de Tufts en Boston, colaboran realizando un estudio exploratorio con la Plataforma Robótica Hookie en las aulas de clases de CASPAN. Metodología general: 1) se realizó entrevistas a los especialistas sobre las necesidades actuales de CASPAN dentro de las aulas. 2) La institución escogió estudiantes del rango de 3 a 11 años que encajaban con el criterio para ser evaluado a su interacción con el robot Hookie. 3) Con la dirección del especialista, se incorporó el robot a las aulas de clase como un estudiante más. 4)Se observó en que objetivos podría dar apoyo el robot y que permita la evaluación del estudiante-robot. 5) Se modificaban y ajustaban las acciones del robot que coincidían o no con los objetivos del estudiante. Resultado: 1) Buena aceptación de parte de los especialistas en el uso de Hookie. 2) Se registro nuevas interacciones de parte de ciertos estudiantes que antes no respondían con los otros robots que residen en CASPAN.**

Palabras claves — Robótica Social, Trastorno del Espectro Autista, Aprendizaje, Robot, Asistente Robótico, Educación, Habilidades Sociales.

I. INTRODUCCIÓN

El autismo es un trastorno neurológico que afecta el desarrollo de habilidades sociales, de aprendizaje y comunicación verbal y no verbal de las personas que lo padecen. Se nombra, trastorno del espectro autista (TEA) debido a que cada individuo puede situarse en un punto diferente del espectro con necesidades, capacidades y competencias diferentes.

Debido a esta diversidad, en un enfoque social y educativo se deben tener estrategias educativas [1] que permitan a cada alumno desarrollar sus capacidades.

Existe documentación de investigaciones [12][13][14] que han mostrado evidencias significativas que el uso de la robótica enfocada a la educación especial, permite estimular el desarrollo de la interacción social en niños que padecen TEA, y en términos generales servir como una herramienta que influya positivamente en su aprendizaje para el desarrollo de habilidades sociales (socio-emocionales).

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00112

En Panamá, el Centro Ann Sullivan (CASPAN) [9] es uno de los centros que se han destacado por su carácter inclusivo, innovador y visión clara con el fin de brindar atención y educación a la población con TEA, compuesta principalmente por niños con diversos compromisos cognitivos.

En este estudio se decide probar experimentalmente la plataforma robótica Hookie [2], la cual permite proveer un

asistente robótico que interactuando con el niño, mejore las habilidades sociales de una muestra seleccionada de los estudiantes de CASPAN. Hookie fue desarrollado y construido en Barcelona, España por el Dr. Jordi Albo-Canals y la empresa DYNA TECH 2012 [10], gracias a fondos provistos por la Unión Europea. Con Hookie se busca atender las funcionalidades que el estudiante debe desarrollar o mejorar en las sesiones establecidas por la especialista del centro.

II. Trabajos relacionados

En la literatura se muestra diversas experiencias con el uso de robótica social en niños con TEA, para nuestro estudio nos enfocaremos en experiencias específicas que se han realizado en CASPAN considerando que esta institución ha llevado a cabo diversas investigaciones trabajando con robots entre ellos: LEGO Mindstorm [3], PLEO [4], CASPER [11], KIBO [5] (ver Fig.1).

A continuación, describiremos algunas de las experiencias de los robots mencionados siendo aplicados a niños de CASPAN.

1) LEGO Mindstorm: Una de las tareas requeridas en el centro, era pasar la lista de los estudiantes en las aulas de clase. Para lograr cumplir con esta tarea se decidió emplear el juego de SIMON DICE (SIMON SAYS), utilizando un robot humanoide (SIMON), creado con LEGO MINDSTORM, a fin de fortalecer la atención y respuesta de los estudiantes. Además, con esta misma plataforma robótica (LEGO MINDSTORM) se construyó un sistema de compras para una tienda ficticia con el fin de desarrollar la capacidad de realizar compras o selección de objetos de uso cotidiano por los niños. Está plataforma llamada MERCADO, contiene componentes de LEGO que permiten detectar los objetos comprados y ejecutar acciones en base a ello dándole retroinformación al niño cuando ha realizado la compra correcta.

2) PLEO: Este es un robot en forma de dinosaurio, que incluye sensores que reaccionan al tacto en la interacción con el estudiante, produciendo sonidos de agrado cuando el niño lo cuidaba y acariciaba adecuadamente. Con PLEO se busca crear en el niño el sentido de "cuidar una mascota", fortaleciendo así el vínculo de cuidado y atención al robot.

3) KIBO: Robot diseñado en Tufts para niños que no tienen capacidad de leer o escribir [5]. Programado por el estudiante y/o por profesor que atiende a la actividad establecida por la especialista.

Fig. 1. izquierda superior-PLEO; centro superior-SIMON; derecha superior-KIBO; izquierda inferior-CASPER; centro inferior-HOOKIE; derecha Inferior-TABITO.

[1]Licenciatura en Ingeniería de Sistemas y Computación, Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Universidad Tecnológica de Panamá. (nakediryai.martinez@utp.ac.pa)

[2]Departamento de Sistemas de Información, Control y Evaluación de Recursos Informáticos, Universidad Tecnológica de Panamá. (victor.lopez@utp.ac.pa)

[3]Fundación Hospital de San Juan de Dios de Barcelona (jalbo@fsj.org)

[4]Universitat Politecnica de Catalunya, Intelligent Data Science and Artificial Intelligence Research Center (olga.sansc@upc.edu)

[5]Departamento de Arquitectura y Redes de Computadoras, Universidad Tecnológica de Panamá. (lydia.holnes@utp.ac.pa)

III. Preparando el entorno de trabajo y definiendo la pregunta de investigación

A fin de poder tener un entorno apropiado para las pruebas experimentales de este proyecto de investigación se ejecutó una fase preparatoria que consistió de las siguientes actividades:

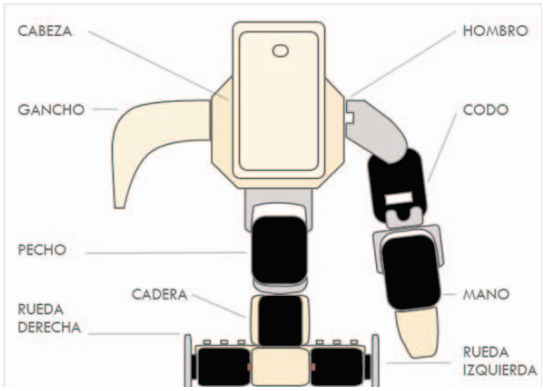
- Inducción a los investigadores sobre los protocolos y buenas prácticas utilizados en CASPAN, incluyendo las pautas de cómo proceder dentro de las aulas, a fin de no perturbar el proceso de aprendizaje y estado emocional de los niños.
- Detalle de la metodología de evaluación para evaluar el progreso con los estudiantes.
- Realización de talleres de robótica social (KIBO, PLEO, SIMON) junto a los especialistas de TEA y liderado por el Dr. Jordi Albo-Canals.
- Análisis de los proyectos empleados anteriormente con los otros robots.
- Observación durante una semana del entorno que las especialistas en TEA utilizan en las diferentes aulas para la muestra seleccionada de estudiantes por una semana en las diferentes aulas.

A. Pregunta de investigación:

¿El uso de la plataforma robótica Hookie implementando el protocolo de actividades diseñado por el terapeuta puede apoyar el aprendizaje de habilidades concretas en el niño con TEA?

B. Características de la muestra seleccionada:

Los salones seleccionados oscilaban en promedio de 7 a 10 estudiantes. Tres salones fueron escogidos (3-5 años, 6-8 años, 9-11 años), donde el criterio de selección fue la alta respuesta que el estudiante obtuvo y fue registrado en las pruebas experimentales de investigaciones realizadas con



otros robots (PLEO, SIMON, etc.) y/o paralelamente la posibilidad de desarrollar alguna habilidad que el robot podría estimular en el estudiante.

IV. Plataforma Hookie

El Dr. Jordi Albo-Canals, creador de la plataforma robótica Hookie, estableció como una meta de su diseño, el que está debía ser fácil de construir con partes electrónicas disponibles en el mercado, lograr un bajo costo de producción con el consecuente bajo precio para su compra y simplicidad

en su programación y uso. Lo que se ha descrito previamente muestra las razones por la que se escogió Hookie para este estudio, pues se busca que las familias tengan acceso a un robot personalizado para sus hijos, donde el precio no sea un limitante.

A. Funciones que cumple Hookie

1) Educativa

- Aplica en programas de educación especial y ser accesible para ser utilizado en casa sin necesidad de tener presente algún técnico o especialista.
- Asiste al especialista de la clase en alguna actividad o en el cumplimiento de algún objetivo específico, asumiendo roles distintos (estudiante, repetidor o entrenador).

2) Social

- Estimular, desarrollar y mejorar las habilidades sociales del individuo mediante la interacción. Ejemplo: jugando.
- Emular acciones específicas (saludar, despedir, afirmar, negar, responder al llamado del especialista como un presente, solicitar algún objeto con los motores del robot).

B. Diseño del robot Hookie

Con unos marcos de plástico de ingeniería impresas en 3D, contiene 9 motores Dynamixel que dan vida a los movimientos realizados por Hookie. Su cerebro está a cargo por una placa NodeMCU, la cual se encarga de enviar comandos a los motores.

El rostro es desplegado por la aplicación de HookieFace App: que simula expresiones de enojo, feliz, sorprendido, falso, malvado, calmado del robot desde un dispositivo móvil smartphone en su cabeza (ver Fig.2, 3 y 4).

El control de comando (ver Fig.5) se hace a través de una aplicación de celular, llamada Hookie Talk. Fue creada para este estudio en particular. Envía siguientes comandos: HOLA, SI, NO, DAME, PRESENTE.

Fig. 2. Esquemático de la plataforma Hookie.

Fig. 3. Circuito general de la plataforma Hookie.

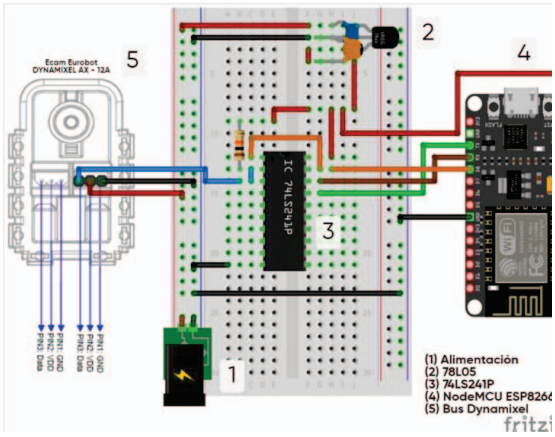


Fig. 4. Plataforma Hookie

Fig. 5. Aplicación de Hookie Talk

Esta adición permite facilitar el uso del robot por parte de los especialistas de CASPAN, para un mayor control de Hookie durante las sesiones a realizar junto a los estudiantes y él envió directo de los comandos sin tener que ingresarlos a una barra de direcciones.

Una librería de sonidos pregrabados también es incluida dentro de la aplicación. Incluyen frases e interjecciones que emulan una comunicación básica hacia el estudiante. Son accionadas junto a los comandos que el especialista active y ejecutados desde el celular. Para un mayor alcance del sonido, se apoyó en una bocina con bluetooth del lugar. Esta

aplicación fue desarrollada en Sketchware [8].

C. *Beneficios de la plataforma Hookie*

- El proyecto Hookie siempre ha buscado ser asequibles para familias o personas de interés.
- Personalizable dada la facilidad de poder manejarse en el IDE Arduino [7] con el lenguaje C++.
- Con la creación de una app de celular, controlar de manera discreta el robot es más sencillo.
- Incorporar frases para una comunicación de manera natural permite abrir espacio al estudiante para participar.

D. *Limitantes*

- Sin batería. Su fuente de poder que proviene de un adaptador de corriente alterna. Esto provoca que la movilidad del robot se reduzca a una zona del salón.
- No bocina. Los comandos de voz son emitidos por el celular que controla el robot, este celular se conecta a una bocina inalámbrica, que está ubicada cerca del robot. Pero permite un mayor alcance de sonido.
- Se requiere un nivel intermedio de programación para modificar a nivel de código las acciones del robot.

V. METODOLOGÍA

El Trastorno del Espectro Autista como tal es una condición de la cual su conocimiento y comprensión varía a medida que surgen nuevos estudios y enfoques de la misma. La llamada robótica social también es un campo que ha buscado descubrir nuevas maneras de apoyar a los investigadores, así como facilitar a las familias que tenga parientes con TEA. Es por esto que cada estudio, busca compartir los nuevos enfoques que resultan de las mismas.

En base a lo que hemos descrito al párrafo anterior la evidencia nos muestra que es necesario utilizar un proceso de co-creación al emplear robótica social para TEA. En consecuencia, la metodología seguida para este estudio se basó en la combinación de los protocolos pedagógicos utilizados por los terapeutas en CASPAN y las técnicas de

programación del robot Hookie para replicar las acciones que los profesores de grado buscan que los niños con TEA imiten y con ello logren nuevas habilidades.

A. Proceso de co-creación de la metodología

En un conjunto de reuniones con los especialistas del centro CASPAN y con sus experiencias previas de robótica social se determinó lo siguiente para este estudio.

- Realizar una inducción sobre las estrategias empleadas por el centro con la finalidad de adaptar el robot a las mismas.
- Se establece con los especialistas, los salones de estudio, así como los estudiantes que permitan evaluar por cada salón.
- El investigador debe estar una semana antes de las pruebas de campo, sin la presencia del robot, con el fin de observar las necesidades de cada estudiante, así como las indicadas por las especialistas de TEA para que los estudiantes se familiaricen con el investigador, y poder implementar esas modificaciones a la plataforma.
- Para la aplicación del robot en el campo, con las experiencias previas con otros robots, se estableció un cronograma, en la que los horarios variaban por cada semana. Esto con el fin de evitar que los estudiantes solo vengan los días que el robot estuviere presente.
- Usar el Registro de aprendizaje del alumno – Objetivo de respuestas discretas (ver Fig.6), la cual es utilizado por el centro como formulario que permite observar los avances del estudiante con respecto a un objetivo y en este caso enfocado con la involucración del Robot. Este registro será realizado por el especialista de TEA.
- En la medida que transcurre las pruebas, hacer cambios a nivel de hardware o software, consultado con las especialistas y el técnico.

B. Estrategia de captura de datos

Tres estrategias se utilizaron para la captura de datos en este proyecto de investigación.

1) Método 1: Formulario de registro de aprendizaje del alumno.

Los datos obtenidos en las sesiones fueron recogidos por los especialistas de CASPAN en el formulario de Registro de aprendizaje del alumno – objetivo de respuestas discretas. En la Fig. 6, mostramos el diseño del documento utilizado para captar los datos.

2) Método 2: Entrevista de manera personal a los especialistas.

A cada maestra de grado se les realizó una entrevista, las cuales se desarrollaron de la siguiente manera:

- Se da a conocer el contexto de la situación actual del robot y los objetivos de la entrevista.
- Se le hace saber a los especialistas que la entrevista es de dominio privado y de carácter investigativo.
- Las preguntas realizadas son abiertas para no limitar las respuestas.
- Las respuestas que arrojen durante la entrevista se evaluarán de manera objetiva.
- Las opiniones, respuestas y recomendaciones que se mencionen durante la entrevista, ayudarán a la mejora de la plataforma.

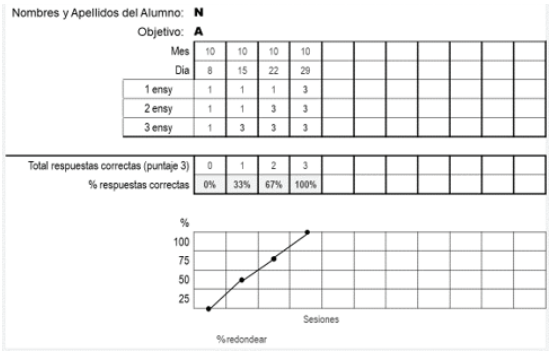
3) Método 3: Método de observación en el aula de clases.

Durante y posterior a las sesiones se utilizó una bitácora de sesiones que documentaban el comportamiento observado del estudiante hacia el robot. Estas notas son pequeñas bitácoras redactados manera informal; adicional a esto, se apoyó en el recurso audiovisual, la cual era una CANON 10i, que grababa lo esencial de las sesiones.

VI. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE APRENDIZAJE ROBOT-TERAPEUTA

Luego del proceso de co-creación para establecer la metodología de uso del robot en proceso de aprendizaje de los niños y de terminar las estrategias de captura de datos de las pruebas experimentales se procedió a diseñar, implementar la arquitectura del sistema (ver Fig.7), manteniendo un balance entre el uso de la tecnología robótica y las intervenciones de los maestros de grado o terapeutas. El mantener este balance es fundamental ya que se trata de un sistema sico-socio-tecnológico que se emplea para una intervención de mejora en seres humanos. En la Fig.8 se observa un sujeto interactuando con el sistema.

Fig. 6 Registro de aprendizaje del alumno – Objetivo de respuestas discretas. Fuente: CASPAN



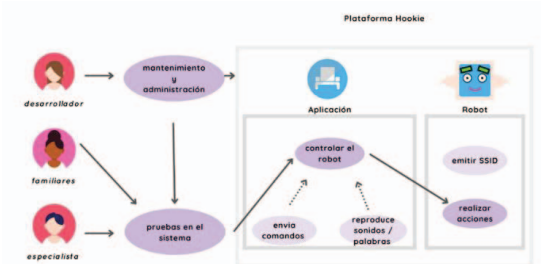


Fig. 7 Arquitectura del sistema R-T.

Fig. 8 Interacción con la plataforma Hookie.

VII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El robot durante las pruebas adoptaba muchos roles para el estudiante, como maestro, estudiante, mediador y la cantidad de estudiantes establecidas al inicio para su estudio variaban, por factores externos como enfermedad, clima, etc.

Hubo modificaciones en la plataforma Hookie (ver Fig.7) para atender los objetivos establecidos para cada estudiante de CASPAN de manera general, ya que la población estudiantil en promedio es de baja funcionalidad.

Se trabajó con los objetivos personales de cada estudiante (ver Fig. 6), establecidos por las especialistas, en lugar de actividades, debido a que la plataforma es nueva para CASPAN y las especialistas deseaban observar cómo Hookie se desenvolvía en el salón de clases.

Las limitaciones de horario solo permitían que se trabajara por un espacio de 20 a 30 minutos, iniciando o terminando las clases. Llevando a cabo acciones como un saludo, una negación ante una pregunta, entre otras, a base de la respuesta del estudiante. Se documentaba en un formulario que el especialista llenaba con lo que observaba y determinaba el nivel de interacción.

Debemos destacar que el trabajo presentado en esta publicación es un caso de estudio introductorio al robot Hookie como alternative a los otros robots utilizados anteriormente. Fundamentalmente se ha validado las funcionalidades técnicas, así como el potencial educativo basado en los comentarios de las especialistas del centro CASPAN. Como línea futura queda la validación terapéutica del robot para lo que se requiere replica estudios como el de [5].

Al final de las pruebas, los especialistas compartieron sus opiniones al respecto.

- En promedio, hubo una buena aceptación de Hookie por parte de los especialistas.
- Los audios de dialogo deben sonar más naturales y no mecánicos.
- Incorporar números, vocales en formato de audio para que el estudiante desee repetir.
- Ampliar las actividades en que el robot podría participar junto a los estudiantes.
- Más movilidad de Hookie dentro del aula, así como incorporar otros movimientos.
- Registro de nuevas interacciones de parte de ciertos estudiantes que antes no respondían con los otros robots que residen en CASPAN.

REFERENCES

[1] Fong, Terrence, Illah Nourbakhsh, and Kerstin Dautenhahn. ”A survey of socially interactive robots.” Robotics and autonomous systems 42.3 (2003): 143-166.

[2] Cordoba D., Albo-Canals, J., Gonzalez, E., Xavi,m Burruezo, X., . (2016, November 2-4).” Hookie: A Cloud Client Robot for Children with Autism Spectrum Disorder.” New Friends, 2016: The 2nd International Conference on Social Robots in Therapy & Education, ISBN: 978-84-945603-9-2, pp 28-30, New Friends 2016 & Omnia Science (Omnia Publisher SL), 2016; Barcelona.

[3] Aguirre, G., Mejía, M. & Sanson, F.. (2016). “Implementación de una plataforma web para trabajar habilidades sociales y de programación en niños con autismo mediante robótica lego”, no publicado.

[4] Innvo Labs, «PLEO rb,» 2012. [En línea]. Available: https://www.pleoworld.com/pleo_rb/eng/products.php.

[5] Albo-Canals, Jordi, et al. "A Pilot Study of the KIBO Robot in Children with Severe ASD." International Journal of Social Robotics 10.3 (2018): 371-383.

[6] Dyna Tech 2012, «MEET HOOKIE,» 2022. [En línea]. Available: http://dynatech2012.com/meet-hookie/.

[7] Arduino, «ARDUINO,» 2022. [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/.

[8] Sketchware Co. Ltd, «Sketchware,» [En línea]. Available: https://sketchware.io/.

[9] Centro Ann Sullivan Panamá, «CASPAN,» 2022. [En línea]. Available: https://caspan.gob.pa/.

[10] Dyna Tech 2012, «DYNATECH2012,» 2022. [En línea]. Available: http://dynatech2012.com/home/

[11] Curley, D., Barco, A., Pico, S., Gallego, P., Zervas, D., Angulo, C., Özcan, B., Delvaux, J., Lhoir, M., Albo-Canals, J., “CASPER Project: Social pet robots facilitating tasks in therapies with children with ASD”, In: New Friends 2016: The 2nd International Conference on Social Robots in Therapy & Education, ISBN: 978-84-945603-9-2, pp.33-34, New Friends 2016 & Omnia Science (Omnia Publisher SL), 2016, Barcelona.

[12] Dautenhahn, Kerstin, and Iain Werry. "Towards interactive robots in autism therapy: Background, motivation and challenges." Pragmatics & Cognition 12.1 (2004): 1-35.

[13] Wainer, Joshua, et al. "The effectiveness of using a robotics class to foster collaboration among groups of children with autism in an exploratory study." Personal and Ubiquitous Computing 14.5 (2010): 445-455.

[14] Huskens, Bibi, et al. "Improving collaborative play between children with autism spectrum disorders and their siblings: The effectiveness of a robot-mediated intervention based on Lego® therapy." Journal of autism and developmental disorders 45.11 (2015): 3746-3755.

Convolutional Neural Network Model for the Detection of Diseases and Pests in Coffee Crops

Modelo de Redes Neuronales Convolucionales para la Detección de Enfermedades y Plagas en Cafetales

Gabriel Grimaldo
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
gabriel.grimaldo@utp.ac.pa

Humberto Rodríguez
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
humberto.rodriguez@utp.ac.pa

Víctor López Cabrera
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
vlopez2010@gmail.com

***Abstract*— The early detection of diseases and pests in coffee crops by means of artificial vision and pattern recognition brings with it the ease of inspection and the reduction of crop losses in coffee plantations. This work proposes a model based on neural networks that is capable of detecting coffee leaves in an image and also classifies them into the most common diseases in the Panamanian tropics. The coffee leaf disease classification model is able to classify the following diseases: Cercospora leaf spot, leaf rust, leaf miner and phoma. This model obtained an accuracy of 100% and a loss of 1.6×10^{-5} during the training phase. Subsequent to the training phase, a validation of the model was performed; during this phase, an overall accuracy of 90% was obtained for each of the diseases and pests. In future work, it is desired to implement this architecture in the vision system of the agricultural robot. The vision system will allow farmers to effectively inspect and manage their crops.**

Keywords*— Deep Learning, Convolutional Neural Networks, Digital image processing, Leaves diseases detection, Coffee crops, Arabica coffee.

***Resumen* — La detección temprana de enfermedades y plagas en los cultivos de café mediante visión artificial y el reconocimiento de patrones trae consigo la facilidad de inspección y la disminución de las pérdidas de cosechas en los cafetales. Este trabajo propone un modelo basado en redes neuronales que es capaz de detectar las hojas de café en una imagen y además las clasifica en las enfermedades más comunes en el trópico panameño. El modelo de clasificación de enfermedades de las hojas de café es capaz clasificar las siguientes enfermedades: mancha de la hoja de cercospora, roya de la hoja, minador de la hoja y phoma. Este modelo obtuvo una precisión del 100% y una pérdida de 1.6×10^{-5} durante la fase de entrenamiento. Posteriormente a la fase de entrenamiento se realizó una validación al modelo, durante esta fase se logró obtener una precisión general de 90% para cada una de las enfermedades y plagas. En futuros trabajos se desea implementar esta arquitectura en el sistema de visión del robot agrícola. El sistema de visión permitirá a los agricultores inspeccionar y gestionar eficazmente sus cultivos.**

Palabras claves* — Deep Learning, Redes neuronales convolucionales (CNN), Procesamiento digital de imágenes, Identificación de enfermedad en las plantas, Plantaciones de café, Café arábigo

I. Introducción

La evolución de las redes neuronales convolucionales, y de la inteligencia artificial en general, ha provocado un cambio rotundo en diferentes áreas de aplicación [1]. Una de las áreas que ha sufrido un cambio importante es la agricultura [2]. Con los avances tecnológicos se ha tratado de tener una mayor eficiencia y control sobre el manejo de los cultivos y su inspección, para obtener un producto de alta calidad para la exportación o el consumo interno. En Panamá, la especie de café arábigo es la más cultivada, especialmente en las tierras altas del país. Cabe destacar que más del 80% del café que se cultiva en Panamá es Arábica, mientras que el 20% restante es Robusta [3].

Actualmente existe una escasez de mano de obra para el manejo de los cultivos de café en el mundo, lo cual justifica la automatización de algunas tareas, tales como la inspección que se realiza para identificar algunas enfermedades y plagas [4]. La detección temprana de estas enfermedades y plagas nos da una ventaja estratégica sobre la enfermedad, ya que al conocer oportunamente lo que aqueja a un cultivo o planta, se incrementan las posibilidades de éxito en el tratamiento o control. Además, esta detección y posterior tratamiento conllevan un beneficio económico para los productores ya que la calidad de su producción aumentaría y las pérdidas por estas afectaciones disminuirían [5]. Es por lo que en los últimos años se han utilizado técnicas de procesamiento de imágenes y machine learning para identificar las diferentes condiciones o afectaciones de las plantas. En este sentido, Ghaiwat y Arora presentaron una revisión de los diferentes métodos que pueden utilizarse para la detección y clasificación de las enfermedades de las hojas de las plantas. En esta revisión destacaron que el método del vecino más cercano (K-NN) es quizás el más sencillo de todos los algoritmos para predecir la clase de una muestra. Ghaiwat y Arora también consideraron en su trabajo el método de máquinas de vectores de apoyo (SVM). Este último es muy útil para clasificar conjuntos de datos de alta dimensión. En este método, la complejidad se reduce a una optimización cuadrática y es fácil controlar la complejidad de las reglas de decisión y la varianza del error. El inconveniente del método de SVM es la dificultad para determinar los parámetros durante el entrenamiento. Si es posible determinar los parámetros, este método sería más eficiente que el método K-NN [6].

Espinoza desarrolló un algoritmo para detectar y clasificar los granos de café infectados por la enfermedad de la broca, tomando imágenes de granos de café con broca y de granos de café sanos; las imágenes fueron etiquetadas y los algoritmos fueron entrenados con modelos de SVM para el reconocimiento automático. En la fase de prueba de este

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00113

modelo, lograron un margen de error del 4%, utilizando una cámara microscópica [7].

Sibiya y Sumbwanyambe crearon una red neuronal convolucional utilizando el marco de neuroph studio. Esta red neuronal convolucional tiene cincuenta capas ocultas para el reconocimiento y la clasificación de las enfermedades de las hojas del maíz. Además, usaron técnicas basadas en el histograma para mostrar el rendimiento de la red neuronal convolucional. El modelo propuesto obtuvo un 92,85% en la precisión global [8].

Recientemente, se han utilizado diversas arquitecturas de redes neuronales convolucionales para el diagnóstico de plantaciones de tomate, patata, maíz, arroz, manzana y uva. En su investigación, Kabir et al. descubrieron experimentalmente que las arquitecturas Xception y DenseNet son las que mejor funcionan para la clasificación de enfermedades de plantas con múltiples etiquetas [9].

Kumar y otros entrenan la arquitectura Inception V3 para la detección de enfermedades en plantas de café. Utilizan técnicas de argumentación de datos y aprendizaje de transferencia para obtener un 97,6% de precisión y 0,35 en el valor de la pérdida de entrenamiento. El modelo de clasificación detecta las enfermedades más comunes en las hojas de café. Estas enfermedades son la mancha de la hoja por Cercospora, la roya de la hoja, el minador y la phoma [10].

II. Seleccion de enfermedades y Pestes

Los cafetales se ven afectados por una gran diversidad de enfermedades y plagas que afectan a las diferentes partes de la planta como son: hojas, flores, frutos, tallos y raíces. Estas enfermedades varían según los factores edáficos y ambientales de la zona en la que se cultiva. Esta investigación se enfoca en las enfermedades que afectan a estas plantaciones en Panamá y que presentan sus síntomas en las hojas de las plantas. Para conocer los rasgos característicos que definen las enfermedades que la red convolucional debe identificar, se utilizó el manual de producción de café orgánico [11].

A. Cercospora

La mancha foliar por Cercospora es una importante enfermedad del café causada por el hongo Cercospora coffeicola. Puede aparecer como dos síntomas distintos en las hojas: la "mancha marrón" (BES) y la "mancha negra" (BS) [12]. En la Fig. 1, se pueden visualizar las enfermedades de Cercospora en una planta de café. En estas imágenes se visualiza la enfermedad en diferentes etapas.

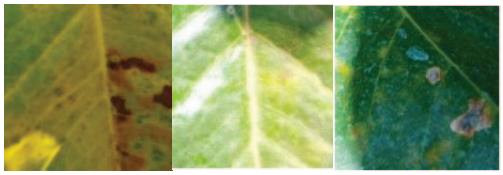


Fig. 1. Mancha foliar por Cercospora en las hojas de café.

B. Roya del café (Leaf Rust)

La roya de la hoja es una enfermedad fúngica (ver. Fig. 2), la cual se propaga en todos los países productores de café y puede causar pérdidas de entre un 10% y un 40% [13].

Fig. 2. Enfermedad de la roya en las hojas de café.

C. Leucoptera caffeina (Minador)

El minador (ver. Fig. *3*) se considera una plaga monófaga que ataca únicamente a los cafetos, y debe su nombre a las galerías o túneles que se forman en la epidermis de la hoja, como consecuencia de la destrucción del tejido de la empalizada que utilizan las orugas para alimentarse. El insecto asociado a esta afección foliar es un microlepidóptero, de hábito nocturno crepuscular [14].

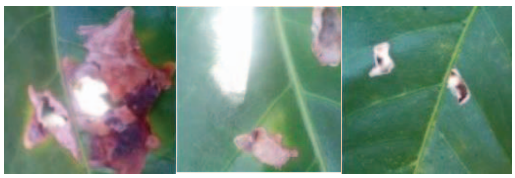


Fig. 3. Enfermedad del minador en las hojas de café.

D. Phoma

La mancha foliar de la phoma (ver. Fig. *4*) es una de las principales enfermedades del café. Esta enfermedad reduce el área foliar fotosintética, y al colonizar las ramas del café puede causar la pérdida de flores y frutos [15].

Fig. 4. Enfermedad de Phoma en las hojas de café.

III. Metodología para la creación y entrenamieto de modelos.

Para la creación de los modelos y el entrenamiento, se identificaron previamente una serie de pasos que se deben seguir para garantizar que, en el entrenamiento, estos modelos obtengan los resultados esperados. Esta serie de pasos se muestra en la Fig. 5 mediante de un diagrama de flujo.

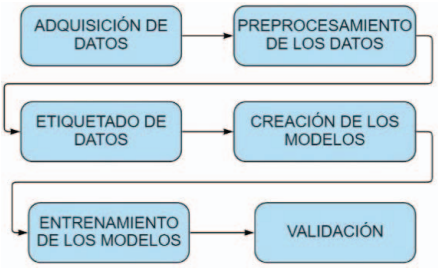


Fig. 5. Flujo de trabajo de la metodología.

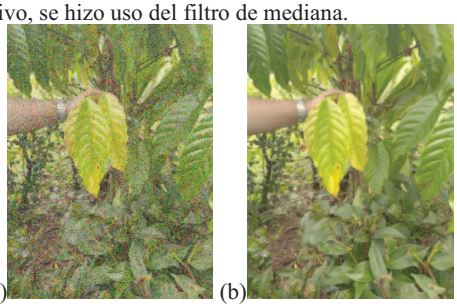
A. Adquisición de los datos

Para la adquisición de datos, se utilizó la cámara del teléfono inteligente del iPhone 12 pro. Además, se tomaron fotos en diferentes ángulos y distancias con el objetivo de simular cómo tomará las fotos un robot o un vehículo aéreo no tripulado (dron). Cabe destacar que estas imágenes tienen el formato DNG y son de 12 bits.

B. Preprocesamiento

Tras la adquisición de los datos, se convirtieron las imágenes al formato PNG ya que es un formato en el que no se pierda tanta información. Posteriormente, se detectó que algunas de las imágenes tenían ruido impulsivo, y otras imágenes eran oscuras.

La Fig. 6 (a) presenta un caso de ruido impulsivo encontrado en las imágenes. Para solucionar el ruido impulsivo, se hizo uso del filtro de mediana.



(a) (b)

Fig. 6. Resultado del filtro de media.

El filtro de mediana fue implementado utilizando la función medianBlur de la librería OpenCV en Python, con un tamaño de kernel de (5,5). El uso de este filtro dio como resultado una imagen sin presencia de ruido impulsivo (ver. Fig. 6 (b)).

(a) *(b)*

Fig. 7. Resultado de la corrección gamma.

En el caso de las imágenes oscuras (ver. Fig. *7* (a)), se hizo uso de la corrección gamma. La Fig. 7 muestra el resultado de la corrección gamma. Para seleccionar el mejor valor de gamma, se probaron diferentes valores en un rango de 2 a 3,5. Con el valor 2.2 (ver. Fig. *7* (b)), se obtuvo una imagen clara con intensidades más distribuidas en el histograma.

C. Etiquetado de los datos

Para el etiquetado de imágenes se utilizó Visual Object Tagging Tool (VoTT), ya que mantiene la compatibilidad con TensorFlow (TF), lo que a su vez facilita el uso de los datos para el entrenamiento del modelo. La siguiente ilustración (ver. Fig. *8*) muestra cómo se etiquetaron las imágenes.

Fig. 8. Etiqueta de imágenes en la interfaz VoTT.

Una vez terminado el etiquetado de los datos, VoTT exporta los datos como un archivo csv que contiene las coordenadas de la enfermedad o plaga. Las coordenadas son obtenidas gracias a la posición de los pixeles en el área demarcada. En la Fig. 8 se puede observar como se demarca las zonas afectadas de la hoja. Estas demarcaciones están definiendo las coordenadas de las enfermedades. Cabe destacar que los distintos colores de sombreado representan una enfermedad distinta.

El etiquetado de los datos se realiza para facilitar el aprendizaje en el modelo de detección de enfermedades, ya que las características que hay que identificar en las hojas son muy finas, tales como pequeñas formas circulares de tonalidad oscura y cambios de color en la hoja.

D. Modelo de detección de hojas de café

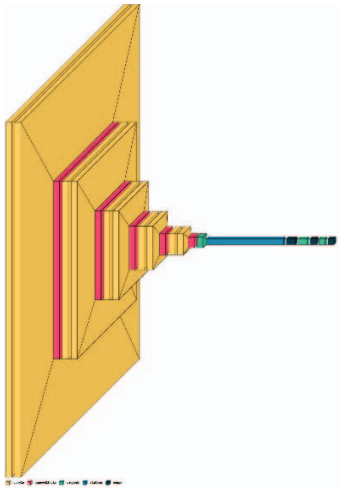


Fig. 9. Estructura del modelo de detección de hojas de café.

Para la creación de los modelos, se hizo uso de tensorFlow y de la librería keras en Python. Este modelo de detección de hojas de café tiene tres clases. La primera clase son las hojas de café, la segunda clase son varias hojas, y la última clase son elementos que pueden aparecer en la escena. Estos elementos se refieren a las nubes, el cielo, el suelo, ramas pequeñas, ramas, hierba, etc. El objetivo del modelo de detección de hojas de café es filtrar las imágenes que no son hojas de café,

para que así el modelo de clasificación de enfermedades en las hojas de café no intente clasificar elementos de otros objetos.

El modelo tiene la arquitectura de redes neuronales convolucionales (ver. Fig. *9*). En este tipo de arquitectura, se aprende directamente de las imágenes, sin necesidad de extraer las características manualmente.

Para la extracción de características, se establece la capa convolucional. Esta capa del modelo cuenta con tres potencias de dos ($2^5, 2^6, 2^7$), que serán utilizadas para generar los filtros convolucionales que extraerán las características de las imágenes. Además, se definen las siguientes dimensiones para los filtros convolucionales: (3,3), (5,5) y (7,7). Los filtros son generados aleatoriamente utilizando el inicializador de kernel uniforme glorot. Cabe destacar, que en primera instancia estos filtros son aplicados aleatoriamente a las imágenes, pero una vez que el modelo aprende descartará los filtros que no den un buen resultado en el entrenamiento, lo cual es evaluado por la métrica de precisión. En esta capa convolucional, la función de activación utilizada es la Unidad Lineal Rectificada (Relu), la cual descarta los pixeles negativos para la conformación del mapa de características.

En cuanto a la capa de pooling, se utiliza la función maxpooling para la agrupación de píxeles y el kernel de esta tiene una dimensión de (2,2), lo cual provoca una reducción de la imagen a la mitad.

En resumen, este modelo cuenta con 10 capas convolucionales que buscan extraer la mayor cantidad de características que definan si es o no una hoja de café. Este modelo hace uso del optimizador Adam, con el objetivo de acelerar la convergencia del algoritmo. Este optimizador calcula las tasas de aprendizaje adaptativas para cada parámetro con el que se entrena la red neuronal convolucional. Además, en este optimizador se define un valor de épsilon 1×10^{-8} con la finalidad de que si el modelo está teniendo buenos resultados en la etapa de entrenamiento y tiene un mal resultado en la validación no se ajusten los pesos de la red con un valor mayor. También hay que tener en cuenta que además de utilizar el optimizador Adam, en la capa de salida, este modelo tiene las tres clases mencionadas previamente, y hace uso de la función softmax, la cual toma valores reales de las diferentes clases y devuelve una distribución de probabilidad. Esto hace que el modelo defina si una imagen es una hoja de café o no con una cierta probabilidad.

En los modelos de Deep Learning es muy común que se produzca un sobreajuste *overfitting* que hace que la red tenga una convergencia muy rápida lo que a su vez provoca un gran número de falsos positivos. Este problema se corrige apagando aleatoriamente un determinado número de neuronas en la capa densa del modelo. En el caso de este modelo, el 50% de las neuronas en la capa densa se desconectan aleatoriamente.

Para el entrenamiento de este modelo, las hojas de café, al igual que las demás hojas, fueron convertidas a escala de grises para que el modelo sólo se centre en el aprendizaje de la morfología de la hoja y no de las características relacionadas con la tonalidad de estas. Además de la transformación a escala de grises, estas imágenes se normalizan en la tonalidad de los píxeles para que las hojas de la imagen no tengan tanta variación en la escala de grises.

En el entrenamiento del modelo de detección de hojas de café, se definió un tamaño de lote de veinte imágenes por paso. El número de pasos por época fue de cien y el número total de épocas fue de cien. La división del conjunto de datos fue, 70% para el entrenamiento, 20% para la validación durante el entrenamiento y 10% para la prueba.

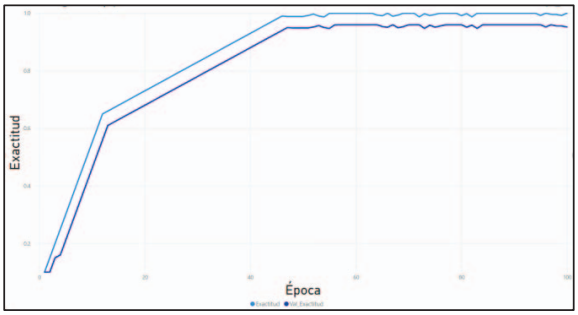


Fig. 10. Exactitud en el entrenamiento del modelo de detección de hojas de café.

La Fig. 10 muestra la curva de aprendizaje obtenida por el modelo. El entrenamiento del modelo comenzó con una precisión del 10% en la primera época y al final del entrenamiento el modelo obtuvo una precisión del 100%. En la validación, se obtuvo una precisión del 95%.

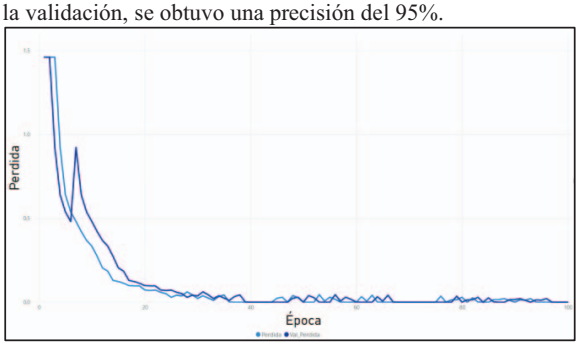


Fig. 11. Función de pérdida en el modelo de detección de la hoja de café.

Por otro lado, el propósito de las funciones de pérdida es calcular la cantidad que un modelo debe tratar de minimizar durante el entrenamiento. Para calcular esta función de pérdida, se utilizó la entropía cruzada categórica, que calcula la pérdida de entropía cruzada entre las etiquetas y las predicciones. En la etapa de aprendizaje de la red neuronal convolucional, el objetivo es que la desviación entre las etiquetas o valores reales y la predicción sea inferior a 0,1. En el caso de este modelo, se obtuvo una pérdida de 1.57×10^{-5} en el entrenamiento y en la etapa de validación de 1.83×10^{-5}. (ver. Fig. *11*).

E. Modelo de detección de enfermedades en las hojas de café

En el caso de este modelo es necesario utilizar una perspectiva diferente, ya que las características que se pretenden extraer en las hojas de café son más complejas que la morfología de una hoja.

Como entrada de este modelo se utilizan imágenes con la dimensión de 224 x 224 píxeles, lo cual nos asegura que no tendremos problemas de memoria al momento de implementar el modelo. En este modelo, se hace uso de imágenes a color, lo que representa que la imagen de entrada

tiene una profundidad de tres. Esta profundidad de tres representa los canales RGB.

Para este modelo es necesario que la imagen de entrada cuente con las especificaciones de entrada mencionadas, debido a que, los factores que diferencia una enfermedad o una peste de otra son las tonalidades de la hoja.

En el caso de este modelo, para la extracción de características se hace uso de un total de 20 capas convolucionales, y de cuatro potencias de dos. Las potencias utilizadas son: ($2^6, 2^7, 2^8$ *y* 2^9). Se seleccionaron estas potencias, ya que durante las pruebas realizadas dieron los mejores resultados.

En este modelo se hizo uso de uso de cinco capas de reducción; al igual que el modelo anterior, en esta capa no se realizaron cambios, ya que el objetivo de esta es el de reducir las dimensiones espaciales para la entrada de la capa siguiente. Se han conformado únicamente cinco capas de reducción, debido a que la dimensión de imagen en una sexta capa seria de 3 x 3 únicamente.

Este modelo de clasificación de enfermedades en las hojas de café define 5 categorías, en las cuales se encuentran las cuatro enfermedades mencionadas anteriormente y una última categoría que es utilizada para las hojas que no cuentan con ninguna enfermedad o peste en sus hojas (hojas sanas).

En este modelo, se ha hecho uso de cuatro capas densas que se encuentran agrupadas de manera secuencial y que cuentan con un total de 400 neuronas cada una.

Este modelo hace uso del optimizador Adamax. En este modelo, se requirió hacer un cambio en el optimizador, ya que no se lograba convergencia. Es necesario recalcar que se realizaron pruebas con el optimizador RMSprop y el optimizador de descenso de gradiente estocástico (SGD). Con estos optimizadores, no se obtuvieron los resultados esperados, a diferencia del optimizador Adamax, con el que logró una correcta convergencia del modelo.

En este optimizador, se definió una tasa de aprendizaje con un valor de 0.0001; un valor de 0.9 para la tasa de decaimiento exponencial para las estimaciones del primer momento; un valor de 0.999 para la tasa de decaimiento exponencial para la norma infinita ponderada exponencialmente y un valor de épsilon de 1×10^{-8}.

Para el entrenamiento del modelo de clasificación de enfermedades y plagas en las hojas de café, se utilizaron 32 imágenes por paso. El número de épocas definido para el entrenamiento de este modelo fue de 100 y el número de pasos por época fue de 200.

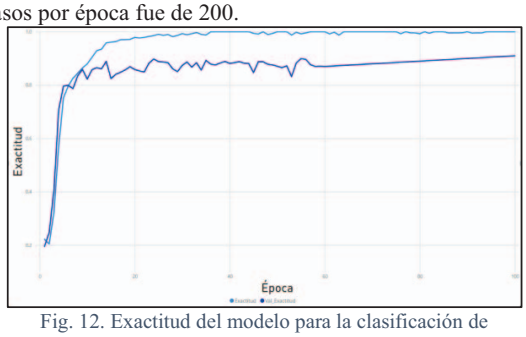


Fig. 12. Exactitud del modelo para la clasificación de enfermedades en las hojas de café.

La gráfica (Ver. Fig. 12) muestra la curva de aprendizaje obtenida durante el entrenamiento. En este gráfico, la curva celeste representa el resultado del entrenamiento, mientras que la curva morada representa la validación del modelo. Como se puede observar, el modelo alcanzó el 100% de precisión en su entrenamiento, pero en la validación, sólo alcanzó el 90%.

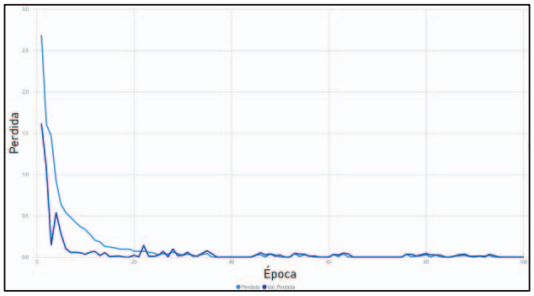


Fig. 13. Función de pérdida del modelo para la clasificación de enfermedades en las hojas de café.

Al igual que con el modelo anterior, la función de pérdida se calculó utilizando la Entropía Cruzada Categórica. En el caso de este modelo, se obtuvo un valor de pérdida de 5×10^{-6} en el entrenamiento y de 1.6×10^{-5} en la validación del modelo (Ver.Fig. *13*). Como se puede apreciar, los valores de pérdida de este modelo son superiores a los del modelo de detección de hojas de café.

F. Seguimiento del modelo

Para realizar las correcciones en la creación del modelo, se debe identificar cuáles son los factores que ocasionan las clasificaciones erróneas. Es por esto que se hizo uso de técnicas de visualización para llevar un seguimiento de lo que está identificando este modelo para realizar la clasificación.

En la actualidad, se han desarrollado algoritmos que ayudan a visualizar las características que está tomando a consideración la red neuronal para identificar una de las categorías.

Selvaraju y otros presentan una técnica para realizar una explicación visual sobre la decisión que ha tomado la red neuronal convolucional. A esta técnica la han denominado como Grad-CAM o Mapa de activación de clases ponderado por el gradiente [16]. El objetivo de este método es crear un mapa de calor en el que se visualizan cuáles son los factores en la imagen que determinan una clase.

Este algoritmo es compatible con los modelos que se encuentran integrados en Tensorflow, pero en el caso de modelos propios es necesario crear las funciones de abstracción de mapa de activación y superposición de mapa de calor.

La función de abstracción de mapa de activación tiene como entrada el nombre de la última capa convolucional, el modelo y la imagen que se desea clasificar. Para identificar el nombre de la última capa de convolución es necesario hacer uso de la función de resumen del modelo, esta función devuelve la estructura del modelo y los nombres de cada capa (ver. Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de un modelo de redes neuronales convolucionales.

Tipo de capa	Salida	Parámetros
Conv2d (Conv2d)	(224,24,64)	1792
Conv2d1 (Conv2d)	(224,24,64)	36928
Conv2d2 (Conv2d)	(224,24,64)	36928
Conv2d3 (Conv2d)	(224,24,64)	36928
Max_pooling (Max2d)	(112,112,64)	0

En el caso del modelo, como entrada de la función de abstracción del mapa de activación, se deben cargar los pesos y la estructura del modelo haciendo uso de la función 'Load model' que se encuentra dentro del API keras. Esta función unificará la estructura del modelo y los pesos de este en una única variable.

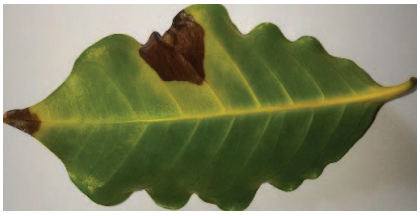


Fig. 14. Imagen original de una hoja de café.

El método Grad-CAM genera un mapa de calor o intensidad a partir de la imagen original. La Fig. 15 muestra este mapa de calor generado a partir de la Fig. 14. Este mapa demarca la zona de la imagen que caracteriza a la enfermedad predicha por el modelo.

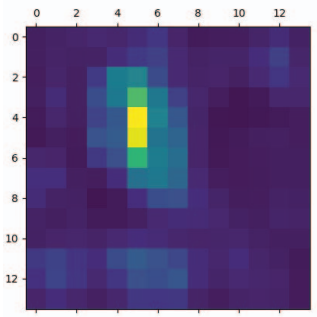


Fig. 15. Mapa de calor generado mediante Grad-CAM.

La función de superposición hereda la imagen original y el mapa de características extraído por la función de abstracción. Esta función da como resultado la superposición entre ambas imágenes (ver. Fig. 16).

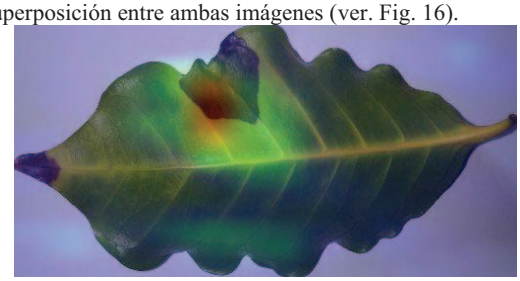


Fig. 16. Mapa de calor generado con Grad-CAM sobre imagen original.

IV. Análisis de resultados

Para corroborar la funcionalidad de los modelos, se hizo uso de una matriz de confusión para evaluar el desempeño del modelo previamente entrenado. En esta evaluación, se hizo uso de un conjunto de datos en el que las imágenes tienen variaciones de iluminación. Estos datos se utilizaron para simular el ambiente real donde se aplicará este modelo.

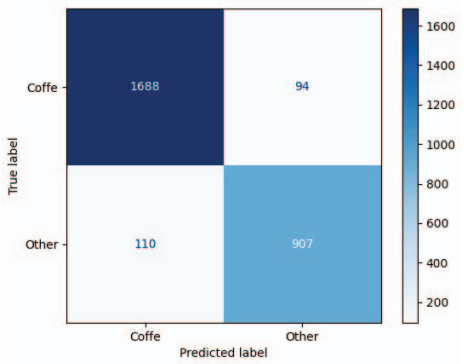


Fig. 17. Matriz de confusión del modelo de detección de hojas de café.

La Fig. 17 muestra los resultados de las predicciones realizadas por el modelo de detección de hojas de café. Con esta matriz de confusión, se calcularon las métricas de sensibilidad, precisión, exactitud y F1-score (ver. Tabla 2). Estas métricas ayudan a conocer la eficiencia que tendrá nuestro modelo en el campo de aplicación.

Tabla 2. Métricas del modelo de detección de hojas de café.

Métrica	Resultado
Sensibilidad	92.88%
Precisión	94.73%
Exactitud	92.71%
F1 score	94.30%
Exhaustividad	93.88%

La Fig. 17 muestra los resultados obtenidos tras la evaluación del modelo de clasificación de enfermedades de la hoja del café.

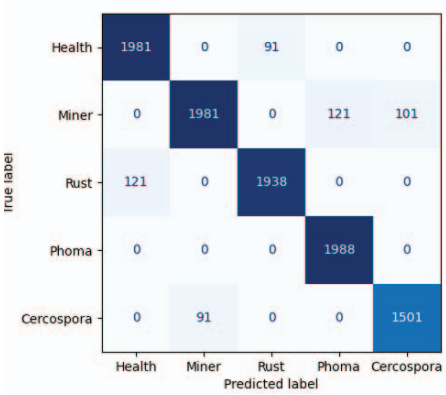


Fig. 18. Matriz de confusión del modelo de detección de enfermedades de las hojas de café.

En el caso del modelo de clasificación de las enfermedades de la hoja del café, las métricas deben ser para cada una de las enfermedades, ya que, a diferencia del modelo anterior que sólo tenía dos categorías, este tiene cinco categorías que deben ser evaluadas individualmente (ver. Tabla 3).

Tabla 3. Métricas de detección de las enfermedades de la hoja del café.

	Enfermedades y pestes en las hojas de café.				
Métrica	Hojas sanas	Minador	Roya	Phoma	Cercospora
Precisión	94%	94%	96%	94%	96%
F1 Score	94%	95%	90%	97%	95%
Recall	94%	96%	93%	100%	94%

V. Conclusiones

El uso del aprendizaje profundo en este ámbito tiene un gran potencial para reducir los problemas de cuidado y gestión de los cultivos. Este trabajo se centró en la creación y prueba de un modelo de clasificación de enfermedades para cafetales que sirva como herramienta para la agricultura de precisión. La implementación de esta arquitectura en el sistema de visión de un robot agrícola permitiría a los agricultores realizar la inspección y el manejo de sus cultivos de manera eficiente. Además, podrían obtener un informe del estado actual de su cultivo de forma inmediata, si se implementa un módulo de visualización de resultados este punto sería posible. Actualmente esta investigación sigue en progreso, con la finalidad de mejorar la precisión y exactitud de los modelos planteados. Por otra parte, se continúa trabajando en la optimización de estos modelos, con el objetivo de que sea posible implementarlo en un sistema empotrado para así poder obtener resultados de forma inmediata. Cabe señalar que el modelo propuesto y probado, se basó en datos de enfermedades y plagas en las hojas de café, pero esto no excluye que pueda utilizarse para la inspección de otros tipos de cultivos.

Referencias

[1]. E. Falk Anderson, A. Pannu, y M. Tech Student, «Artificial Intelligence and its Application in Different Areas Related papers Review On Art ificial Int elligence : A Boon or Bane to Humans Int ernat ional Journal of Scient ific Research in Science and Technology IJSRST Playing Smart-Art ificial Int el», Certif. Int. J. Eng. Innov. Technol., vol. 9001, n.o 10, 2008.

[2]. S. Oluyemi, «The Benefits of Artificial Intelligence in Construction», Trimble, n.o January, 2021, [En línea]. Disponible en: https://constructible.trimble.com/construction-industry/the-benefits-of-ai-in-construction

[3]. M. Otero, «Una Guía Del Café Especial en Panamá - Perfect Daily Grind Español», Perfect Daily Grind , 23 de noviembre de 2020. https://perfectdailygrind.com/es/2020/11/23/una-guia-del-cafe-especial-en-panama/ (accedido 2 de mayo de 2022).

[4]. J. Pucci, «La escasez de mano de obra desafía a la agricultura de EE. UU. - Estudio - AgriBusiness Global», AgriBusiness Global, 28 de agosto de 2018. https://www.agribusinessglobal.com/es/markets/escasez-de-mano-de-obra-desafiando-el-estudio-agricola-estadounidense/ (accedido 2 de mayo de 2022).

[5]. B. Roldán Ortega, R. Roshan Biswal, y E. Sánchez DelaCruz, «Detección de enfermedades en el sector agrícola utilizando Inteligencia Artificial», Res. Comput. Sci., vol. 148, n.o 7, pp. 419-427, 2019, doi: 10.13053/rcs-148-7-31.

[6]. S. N. Ghaiwat y P. Arora, «Detection and Classification of Plant Leaf Diseases Using Image processing Techniques: A Review», Int. J. Recent Adv. Eng. Technol., vol. 2, n.o 3, pp. 1-7, 2014.

[7]. N. Espinoza Villafuerte, «Diagnóstico automatizado para la clasificación de café trillado con broca mediante procesamiento de imágenes con Deep Learning», Universidad Peruana Unión, Lima, Peru, 2019. Accedido: 12 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1961

[8]. M. Sibiya y M. Sumbwanyambe, «A Computational Procedure for the Recognition and Classification of Maize Leaf Diseases Out of Healthy Leaves Using Convolutional Neural Networks», AgriEngineering 2019, Vol. 1, Pages 119-131, vol. 1, n.o 1, pp. 119-131, mar. 2019, doi: 10.3390/AGRIENGINEERING1010009.

[9]. M. M. Kabir, A. Q. Ohi, y M. F. Mridha, «A Multi-Plant Disease Diagnosis Method Using Convolutional Neural Network», pp. 99-111, 2021, doi: 10.1007/978-981-33-6424-0_7.

[10]. M. Kumar, P. Gupta, P. Madhav, y Sachin, «Disease Detection in Coffee Plants Using Convolutional Neural Network», Int. Conf. Commun. Electron. Syst., pp. 755-760, jul. 2020, doi: 10.1109/ICCES48766.2020.9138000.

[11]. C. Abrego J., PROYECTO INTEGRAL PARA EL DESARROLLO DE LA COSTA ABAJO DE COLÓN. Panama: Ministerio de desarrollo agropecuario, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.idea.gov.co/esco/idea/programas/Paginas/proyectoIntegralUraba.aspx

[12]. C. C. L. Andrade et al., «Infection process and defense response of two distinct symptoms of Cercospora leaf spot in coffee leaves», Phytoparasitica, vol. 49, n.o 4, pp. 727-737, sep. 2021, doi: 10.1007/S12600-021-00902-2.

[13]. M. D. C. Silva et al., «Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease», Brazilian J. Plant Physiol., vol. 18, n.o 1, pp. 119-147, 2006, doi: 10.1590/S1677-04202006000100010.

[14]. O. Guerreiro Filho, «Coffee leaf miner resistance», Brazilian J. Plant Physiol., vol. 18, n.o 1, pp. 109-117, 2006, doi: 10.1590/S1677-04202006000100009.

[15]. W. B. Moraes, W. C. De Jesus Junior, L. De Azevedo Peixoto, W. B. Moraes, S. M. Coser, y R. A. Cecílio, «Impact of climate change on the phoma leaf spot of coffee in Brazil», Interciencia, vol. 37, n.o 4, pp. 272-278, 2012, doi: 10.13140/2.1.1152.8325.

[16]. R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, y D. Batra, «Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization», Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis., vol. 2017-October, pp. 618-626, dic. 2017, doi: 10.1109/ICCV.2017.74.

Design, modeling and simulation of the navigation and control systems for an autonomous sailboat using ROS-Gazebo

Diseño, modelado y simulación de los sistemas de navegación y control de un velero autónomo por medio de ROS-Gazebo

José S. Martínez L.
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
jmartzleon@gmail.com

Humberto Rodríguez
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá
humberto.rodriguez@utp.ac.pa

***Abstract*— The purpose of this article is to present the advances in the development of the navigation systems of an autonomous sailboat using the Gazebo simulation environment, which is based on the Robot Operating System (ROS). This type of vessel is known as a robotic sailboat and their main characteristic is that they have the capacity to perform planning and navigation tasks in an automatic manner without the need for human input. In essence, a robotic sailboat uses digital control systems to perform the same tasks that adjust the course of a traditional vessel, such as sail control and rudder actuation. The advantage of using a simulation environment such as Gazebo for this purpose is that its open-source nature allows code from different developers to be compiled and incorporated for various purposes such as the implementation of sensors or environmental variables, like wind and swell, inside the simulation. Furthermore, the package architecture that ROS uses enables a modular modeling of the different parts, mechanisms, and systems of the sailboat. In this way, changes of the various components, such as the sails, can be made, to test their performance under the same conditions. Results show that the study of the boat performance for different sail configurations and their control is possible through ROS-Gazebo.**

Keywords — aerodynamics, control, simulation

***Resumen* — La finalidad de este artículo es la de presentar los avances en el desarrollo de los sistemas de navegación de un velero autónomo por medio de un modelo de este dentro del entorno de simulación Gazebo, el cual está basado en el Sistema Operativo Robótico (en inglés Robot Operating System, ROS). Este tipo de embarcaciones se conocen como veleros robóticos y su principal característica es que tienen la capacidad de realizar las tareas de planeación y movimiento de forma automática y sin necesidad de participación humana. En esencia, un velero robótico utiliza sistemas de control digital para realizar las mismas tareas que ajustan el rumbo de un velero tradicional, como lo son el control de las velas y la actuación del timón. La ventaja de utilizar un entorno de simulación como Gazebo para este propósito es que su naturaleza de fuente abierta permite recopilar e incorporar código de diferentes desarrolladores para diversos propósitos como la implementación de sensores o factores medioambientales, como viento y oleaje, dentro de la simulación. Además, la arquitectura de paquetes que utiliza ROS hace posible un modelado modular de las diferentes partes, mecanismos y sistemas del velero. De esta forma se pueden realizar cambios de los diferentes componentes, como es el caso de la vela, para probar su rendimiento bajo las mismas condiciones. Los resultados muestran que el estudio del funcionamiento del bote con diferentes velas y su control es posible en ROS- Gazebo.**

Palabras claves — aerodinámica, control, simulación

I. INTRODUCCIÓN

El interés reciente por la investigación y desarrollo de los vehículos de superficie autónomos (ASV por sus siglas en inglés) se da debido a la necesidad de un mejor monitoreo de los ecosistemas marino-costeros y del medio ambiente, principalmente. En este sentido, para entender la compleja relación entre los océanos y la atmósfera se requiere de una amplia gama de herramientas de observación. Los medios utilizados tradicionalmente para estas tareas incluyen los aviones, satélites, boyas y embarcaciones de investigación. Sin embargo, cada una de estas opciones presenta limitaciones considerables, las cuales incluyen problemas de visibilidad, cobertura geográfica, resolución y muestreo espacial [1]. La mayoría de la investigación sobre los ASV se ha llevado a cabo en embarcaciones de corto alcance y que utilizan medios de propulsión como motores eléctricos o de combustión [2].

Los veleros robóticos presentan una serie de ventajas por sobre dichas embarcaciones las cuales justifican su investigación y desarrollo. Para empezar, los veleros robóticos están propulsados exclusivamente por una fuente de energía prácticamente ilimitada, la cual es el viento [3] [4]. Esto permite que sean capaces de realizar viajes más largos que sus contrapartes con sistemas de propulsión eléctricos o de combustión. Esta especial característica también se traduce en un ahorro económico ya que se evita el uso de combustibles y de equipos pesados dentro del casco, dando lugar a una maximización considerable del espacio y a mayores capacidades de carga útil. Para el caso de las embarcaciones, contar con más espacio a bordo significa poder montar más instrumentos y equipos científicos para realizar una recolección de datos del entorno marino a menor costo [5]. Adicionalmente, dependiendo de la robustez y complejidad del sistema de navegación implementado, los operadores pueden simplemente programar una trayectoria y liberar el

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00114

bote desde puerto, a diferencia de otros métodos como por ejemplo los que utilizan Radio Control.

Debido a las características una flota de veleros robóticos puede potencialmente inspeccionar una zona de interés particular y recopilar información para contribuir a modelos climatológicos ya existentes para volverlos más robustos. Además, los veleros autónomos también tienen otras aplicaciones, tales como, la recolección de datos del suelo marino, vigilancia de límites marítimos, recuperación de instrumentos científicos, transporte de carga entre embarcaciones y seguimiento a vehículos sumergibles para transmitir datos a la superficie [6] [7].

Si bien la comunidad científica se beneficia grandemente de este tipo de embarcaciones, la mayoría de los avances dentro de este campo se dan gracias a las competencias de veleros autónomos en las cuales los equipos, conformados por estudiantes, profesores e investigadores deben desarrollar botes con diferentes grados de autonomía para cumplir ciertos desafíos. Los más relevantes son la *International Robotic Sailing Regatta* [8], el *World Robotic Sailing Championship* [9] y el *Microtransat* [10]. Estas competencias de alto rendimiento han llevado al desarrollo de veleros robóticos muy sofisticados como el VAIMOS [5] y el AVALON [11], que han servido como base para varios grupos de investigación y por lo tanto cuentan con una extensa literatura.

A pesar de sus grandes ventajas, los veleros en general presentan diversos problemas. Entre ellos se encuentra el hecho que es imposible la navegación en línea recta cuando el objetivo está directamente en contra del viento [3]. Por lo tanto, una de las ramas de la investigación de este tipo de vehículos se ha enfocado en desarrollar algoritmos que permitan navegar en zigzag de forma eficiente. El enfoque que se les da a estos algoritmos es el de la optimización del tiempo de viaje del bote, siendo el principal objetivo el de disminuir la distancia entre el bote y su meta lo más rápido posible al utilizar los datos de posición del objetivo, la posición y dirección actual del bote y la dirección y velocidad real del viento [12]. Otros métodos que utilizan algoritmos más robustos consideran una mayor cantidad de fuentes de información como: la densidad del aire, el área de la vela, la velocidad aparente del viento relativo a la vela y la resistencia hidrodinámica total. Adicionalmente, se hace uso de la detección de objetos en tiempo real por medio de sensores (unidades de medición inercial, GPS, anemómetros y veletas de viento) lo que le permite al bote reaccionar a los cambios repentinos del clima a través de un cálculo periódico [7]. Esto se complementa con controladores PID y controladores de lógica difusa en los componentes mecánicos del bote (el timón y la vela) para mantener una dirección constante respecto al viento [2]. Cabe mencionar que, para el desarrollo de este tipo de sistemas, es bastante común desarrollar una simulación utilizando todos los datos disponibles y posteriormente validarlos con un modelo experimental [13].

En general, se puede decir que la mayoría de los métodos para el modelado de veleros robóticos son bastante similares. La gran mayoría debe realizar simplificaciones bastante grandes en cuanto al modelado dinámico del bote debido a las condiciones incontrolables como las características del viento y el movimiento causado por el oleaje y las corrientes marinas. La mayoría de los modelos dinámicos se enfocan en la vela principal y se hace un especial énfasis en el movimiento de guiñada, ignorando el balanceo y cabeceo [14]. Lo que se busca en esta investigación es encontrar una forma viable de convertir un velero convencional en uno autónomo, por medio de la implementación de un sistema de control digital, el cual incorpore sensores, actuadores y microcontroladores.

La simulación permite realizar las pruebas necesarias para identificar la configuración óptima del modelo real, reduciendo así significativamente los costos que conlleva la prueba de concepto. Además, una herramienta de este tipo puede ser fácilmente modificada para estudiar veleros con diferentes diseños en un futuro.

II. METODOLOGÍA

A. Mecánica de los veleros

La dinámica de las embarcaciones es un problema altamente no-lineal y variable en el tiempo [15] que depende de una cantidad considerable de factores externos impredecibles dentro de los que se incluyen el viento, el oleaje y las corrientes marinas [14] [16]. Ahora, si se analiza el caso particular de un velero que utiliza solamente el viento como principal medio de propulsión y cuyas características de velocidad pueden cambiar de forma drástica en escalas temporales y espaciales muy cortas, se obtiene un sistema que es altamente complejo [17]. Al estar expuestos a dos medios diferentes, los cuales son el aire atmosférico y el agua sobre la que se desplazan, los veleros ven su movimiento afectado tanto por fuerzas aerodinámicas como hidrodinámicas [18]. Los elementos mecánicos de los veleros se diseñan con la finalidad de aprovechar al máximo estas fuerzas y obtener la mayor cantidad de movimiento posible. Sin embargo, existen diferentes enfoques de diseño que resultan en diversas configuraciones de vela, orza, cabina, quilla, casco y timón.

La vela es el principal componente que distingue a los veleros de otras embarcaciones. Dentro de un velero tradicional, la vela mayor es la encargada de cambiar la dirección del velero por medio de giros a favor o en contra de la dirección del viento y es la de principal interés en este estudio. Al clasificar las velas por su forma y material, se encuentran dos tipos principales: las velas de tela y las velas de ala rígida [2]. Entre las ventajas de las velas de tela está el hecho que son más fáciles de rizar y su forma se puede alterar al tensionar y soltar el sistema de cables que las controla. Las velas más simples actúan como un paracaídas que atrapa el viento y como consecuencia genera movimiento. Si bien este tipo de velas cumple su función, su diseño sencillo limita al bote a la misma velocidad y dirección del viento [18].

El otro tipo de velas son las velas de ala rígida. Las velas de ala rígida tienen una estructura rígida que presenta una sección transversal aerodinámica como el ala de un avión [19]. Este tipo de vela proporciona una serie de ventajas sobre las velas de tela que favorecen su implementación en los veleros autónomos. Para empezar, presentan una mejor relación sustentación-arrastre que las velas de tela [20]. Además, son más eficientes para navegar a favor del viento y mantienen esta eficiencia aun cuando se navega en dirección cercana al viento. Se puede mencionar también que estas no necesitan elementos estructurales adicionales para sostenerse y que son más confiables que las velas de tela. Finalmente, se sabe que las velas de ala rígida actúan como un aparejo balanceado y permiten lograr una mejor eficiencia energética [21].

El sistema de propulsión de las velas de ala rígida se obtiene cuando el flujo de aire interactúa con la vela y es una función de la sección transversal del perfil alar. Para lograr esta fuerza es necesario orientar la vela en un ángulo de

ataque. El ángulo de ataque (α) se define como el ángulo entre la cuerda y la dirección del viento relativo. Debido a que los veleros autónomos deben operar con el viento tanto a babor como a estribor, por lo general se utilizan perfiles alares simétricos. Sin embargo, los perfiles asimétricos presentan un coeficiente de sustentación-arrastre mayor [19].

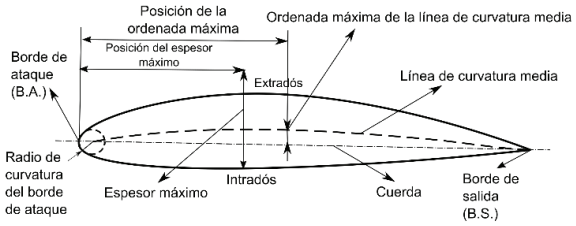


Fig. 1. Nomenclatura del perfil alar.

La fuerza que resulta en la dirección opuesta a la deflexión del viento cuando este golpea el perfil alar se conoce como fuerza aerodinámica. La fuerza aerodinámica se puede descomponer en un componente perpendicular a la dirección del viento conocido como sustentación (L), el cual empuja al velero permitiendo su movimiento contra la dirección del viento, y un componente paralelo conocido como arrastre (D). Estos componentes son una función de la densidad del medio (ρ), la velocidad del ala rígida (V), el área superficial (A) y coeficientes de sustentación (C_L) y de arrastre (C_D) propios de cada perfil alar.

$$\vec{F}_T = \vec{L} + \vec{D} \tag{1}$$

$$\vec{L} = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_L \tag{2}$$

$$\vec{D} = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_D \tag{3}$$

La velocidad y dirección del viento también tiene ciertas convenciones. El viento real (TW) se define como el viento que sopla en referencia al sistema de coordenadas de la Tierra y se describe por la velocidad del viento real (TWS) y el ángulo del viento real (TWA). La interacción entre la velocidad del velero (BS) y la velocidad del viento real genera un viento aparente (AW) que se describe por la velocidad del viento aparente (AWS) y el ángulo del viento aparente (AWA) [22].

$$\overrightarrow{AW} = \overrightarrow{TW} - \overrightarrow{BS} \tag{4}$$

$$AWA = \arctan\left(\frac{\sin(TWA) * TWS}{BS + \cos(TWA) * TWS}\right) \tag{5}$$

$$AWS = ((\sin(TWA) * TWS))^2 + (BS + \cos(TWA) * TWS)^2)^{1/2} \tag{6}$$

La navegación requiere de consideraciones especiales para poder moverse de un punto A hacia un punto B sin estancarse debido a que no se cuenta con otros métodos de propulsión adicionales. Los Rumbos de Navegación (Points of Sailing) describen los diferentes ángulos del viento en los que un velero puede navegar. El rumbo de navegación se elige dependiendo hacia donde se dirige el velero y desde donde sopla el viento. La navegación en ceñida o *close-hauled*, la cual se da a 45° desde la dirección del viento, es la más utilizada en el caso que se tenga que ir en contra de la dirección del viento. Cuando el velero se mueve en ceñida de una dirección a otra, es decir, cruza el viento por la popa, dice que este realiza una maniobra de virado o *tacking*. La maniobra opuesta es la de trasluchado o *jibing*.

Fig. 2. Rumbos de navegación a vela.

La descripción de la posición de la embarcación se da por medio de diversos marcos de referencia. Cuando se trabaja solamente con 3 grados de libertad (*surge*, *sway* y *yaw*) en la embarcación se pueden hacer uso de los marcos de referencia descritos por Fossen [23]. El marco BODY {b} es un marco de coordenadas móvil que se mueve en la embarcación y tiene un origen. El marco ECI {i} es un marco de referencia inercial centrado en la Tierra. El marco ECEF {e} es un marco de referencia centrado en la Tierra y fijado en la Tierra cuyos ejes rotan de forma relativa al marco de referencia inercial ECI {i}. Finalmente, el marco NED {n} utiliza la convención North-East-Down.

El movimiento de una embarcación que se somete a oleaje, viento y corrientes se puede modelar por medio de las ecuaciones para 6 grados de libertad que describen las fuerzas externas X, Y, Z y los momentos K, M, N [23] [24]. Es posible modelar las embarcaciones tomando como base las ecuaciones utilizadas en robótica:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + M_C(q,\dot{q})\dot{q} \tag{7}$$

En donde q es un vector de ángulos de articulación, τ es un vector de torque, M es la representación inercial del sistema y M_C es la matriz de Coriolis. Se adicionan a la ecuación los siguientes componentes:

$$\tau + \tau_{wind} + \tau_{wave} = M\dot{v} + M_C(v)v + M_D(v)v + g(\eta) + g_0 \tag{8}$$

En donde M_D son matrices de amortiguamiento y g es un vector gravitacional. Las velocidades fijas al cuerpo están descritas por el vector:

$$v = [u, v, w, p, q, r]^T \tag{9}$$

Y de igual forma la posición y los ángulos de Euler están descritos por el vector:

$$\eta = [x^n, y^n, z^n, \Phi, \theta, \psi]^T \tag{10}$$

B. *Entorno de simulación*

El Robot Operating System (Sistema Operativo Robótico) es un marco estandarizado y set de herramientas de desarrollo de fuente abierta para aplicaciones de robótica. Se conforma de paquetes y librerías que permiten trabajar con hardware periférico. ROS es utilizado a través del ámbito académico, investigativo e industrial y su principal plataforma de desarrollo es Ubuntu. ROS se ha convertido en el entorno estándar para desarrollo de aplicaciones de robótica debido a su naturaleza modular, de código abierto, basada en herramientas y sin costo alguno. Los principales objetivos de ROS son la abstracción de hardware, el control de dispositivos de bajo nivel, la implementación de funcionalidades de uso común, el paso de mensajes entre procesos y la gestión de paquetes [25].

Cho et al. [26] utilizan el término meta-sistema operativo para describir ROS. Esto se debe a que ROS se ejecuta sobre el sistema operativo existente y hace uso de varias características de este como: el sistema de manejo procesos, el sistema de archivos, la interfaz de usuario y el compilador de programas. Además de estas características, ROS proporciona funciones como la transmisión y recepción de datos entre hardware heterogéneo, la planificación y el manejo de errores, las cuales son esenciales para el desarrollo de aplicaciones robóticas. Otra de las grandes ventajas de ROS es el ecosistema que se ha creado a su alrededor ya que permite comunicar datos entre múltiples sistemas operativos, hardware y programas. Por lo tanto, ROS hace posible integrar las diferentes tecnologías que existen en el mercado dentro de un solo entorno. Además, al ser de código abierto, los mismos usuarios son los encargados de desarrollar y distribuir paquetes.

ROS funciona por medio de nodos, los cuales son unidades mínimas de procesos ejecutables que trabajan de forma independiente e intercambian datos de forma sistemática. Un paquete se crea al tener varios de estos procesos con el mismo propósito. Agrupar procesos en paquetes permite una distribución más fácil y conveniente. Los paquetes se vuelven públicos por medio de repositorios los cuales permiten obtenerlos, compartirlos y modificarlos. Es posible también desarrollar en una diversidad de lenguajes de programación incluidos Python, C++, C#, JAVA y Ruby. Esto se hace por medio de una librería cliente que puede ser importada al momento de elaborar programas en ROS. Este permite reutilizar código en la investigación y el desarrollo de aplicaciones robóticas a un nivel global.

Para la simulación de robots dentro de ROS se utiliza Gazebo. Este es un simulador dinámico en 3 dimensiones con la capacidad de simular con precisión y eficiencia poblaciones de robots en entornos complejos de interior y exterior [27]. Gazebo ofrece simulación física con un alto grado de fidelidad al contar con varios motores de física que permiten resolver fuerzas de colisión, contacto y reacción. Además, posee una amplia variedad de modelos de robots, ambientes y sensores, dentro de los que se incluyen cámaras, láseres, sonares, Sistema de Posicionamiento Global y Unidades de Medición Inercial en una interfaz gráfica conveniente. Esta interfaz gráfica permite la exploración y manipulación del ambiente 3D simulado. El programa posee también la capacidad de incluir *plugins* escritos en C++ y también una integración con ROS a través de mensajes. La integración de ROS con Gazebo se da por medio del paquete *gazebo_ros_pkgs*. Este paquete contiene las herramientas necesarias para simular robots de cuerpo rígido dentro de Gazebo. Para poder simular robots desde ROS en Gazebo el paquete utiliza mensajes, servicios y reconfiguración dinámica. Además, la versión más actualizada contiene soporte para controladores, sensores y plugins.

Por todas estas características Gazebo es una de las herramientas más utilizadas dentro de la comunidad científica para diseño de robots, pruebas de algoritmos de robots y pruebas de regresión en escenarios realistas. Ahora bien, a pesar de todas sus ventajas, Gazebo fue concebido como un simulador de robots terrestres, aéreos y espaciales por lo cual hay muy poco material disponible para vehículos sobre superficies acuáticas [28]. De hecho, no existe aún un simulador estandarizado para robótica marina y los que existen se enfocan principalmente en simulación subacuática [29] [30] [31]. Sin embargo, se ha demostrado que es posible lograr una simulación fiable en ambientes marinos utilizando Gazebo como base [32] [33]. Tomando estos trabajos como referencia, se partió al desarrollo de los paquetes necesarios para poder simular un velero autónomo dentro de Gazebo.

Para poder visualizar un robot en Gazebo es necesario generar un archivo de descripción de este. Esto se hace por medio de un archivo de tipo URDF (Unified Robot Description Format). Este archivo utiliza un formato de lenguaje que describe los eslabones, articulaciones, y demás propiedades de un robot en un marco de gramática de tipo XML. Dentro de este formato es posible establecer la estructura, dimensiones, propiedades visuales, inerciales, de colisión, los tipos de eslabones y sus límites de esfuerzo y movimiento, así como toda la cinemática general del robot. Es importante distinguir entre URDF y SDF (Simulation Description Format), ya que este último describe también el ambiente dentro de la simulación.

Los eslabones forman la estructura principal del robot. El formato URDF permite describir sus propiedades inerciales, visuales y de colisión. Para la inercia es necesario especificar la masa del eslabón, los momentos de inercia *ixx*, *iyy*, *izz* y los respectivos productos de inercia *ixy*, *ixz*, *iyz*. Para describir la geometría del objecto es posible implementar una malla en formato STL o COLLADA que se especifica dentro de las propiedades visuales. Para finalizar, se debe establecer una malla de colisión, la cual puede ser de igual tamaño, más pequeña o grande, que la malla de propiedades visuales dependiendo de la capacidad computacional que se tenga.

Las articulaciones son las encargadas de unir los diferentes eslabones, así como también de determinar su cinemática. Un elemento de articulación en el formato URDF puede ser de tipo revoluta, continuo, prismático, fijo, flotante o planar. Al determinar una articulación como uno de los tipos mencionados anteriormente, automáticamente se establecen sus restricciones de movimiento. Sin embargo, es necesario especificar el eslabón padre (el que antecede a la articulación) y el eslabón hijo (el eslabón posterior). Además, dependiendo del tipo de articulación se tienen que establecer sus propiedades dinámicas (fricción y amortiguamiento), sus límites máximos y mínimos, así como la velocidad permitida del mismo.

Es posible describir la relación entre un actuador y una articulación a través de un elemento de transmisión en formato URDF. Para implementar un elemento de transmisión se declaran el tipo de transmisión, la articulación que va a estar

sujeta al sistema de transmisión, el actuador y de forma opcional se puede describir una reducción mecánica en caso de ser necesario.

Si bien el archivo URDF describe la dinámica y cinemática del robot, este no permite describir la posición de este dentro del mundo (*world*) de la simulación. El *Simulation Description Format* (SDF) descrito anteriormente se utiliza para este propósito, además de que permite incluir otros elementos, a parte del robot, dentro del mundo. Para indicar que un elemento dentro del código debe ser llamado dentro del mundo de Gazebo es necesario utilizar la etiqueta <gazebo> [65]. Cabe recalcar que no es necesario convertir de un formato a otro de forma manual ya que Gazebo convierte automáticamente los archivos de tipo URDF a SDF cuando se inicia la simulación.

La mejor forma de abrir Gazebo por medio de ROS es a través de un archivo de tipo *launch* y el comando *roslaunch*. Este tipo de archivo contiene toda la información necesaria para cargar un mundo con todos sus modelos y componentes, un archivo URDF especificando sus condiciones iniciales, así como también una serie de argumentos que modifican el comportamiento de Gazebo. Por ejemplo, se puede especificar si la simulación inicia en pausa, si los nodos de ROS deben utilizar como referencia el tiempo de la simulación y si la interfaz de usuario es necesaria al iniciar, entre otras funciones. Un paquete puede contener diversos archivos de tipo *launch* en tal caso que se tengan diferentes mundos o modelos de robot.

Para mejorar las capacidades de la simulación Gazebo hace uso de plugins. Un plugin es un conjunto de código que añade una cierta funcionalidad adicional y que se agrega a la simulación al ser declarado en los archivos que conforman un paquete. Los seis diferentes tipos de plugins que se pueden utilizar actualmente en Gazebo son: de mundo, de modelo, de sensores, de sistema, visuales y de interfaz gráfica de usuario.

Los plugins más utilizados son los visuales, de modelo y de sensores, ya que estos son los únicos que pueden ser declarados en un archivo URDF. Los tipos de plugin que más interesan dentro de esta investigación son los de modelo y de sensores. Los plugin de modelo alteran el comportamiento del robot cuando este se somete a una influencia externa (como el viento). Los plugins de sensores permiten agregar sensores al robot como cámaras, GPS, IMU y láseres.

Para el control de las articulaciones se hizo uso de ROS Control. ROS Control es una serie de paquetes desarrollados a partir del controlador del modelo de robot PR2 y el cual incluye interfaces de controlador, administradores de controlador e interfaces de transmisión y de hardware. Este conjunto de paquetes permite establecer un set point de entrada y comparar este valor con el estado de las articulaciones a partir de los encoders de los actuadores del robot por medio de un controlador PID para controlar la salida. Esta señal de salida indica el esfuerzo (fuerza o torque) deseado, aunque la misma puede variar dependiendo de la aplicación (posición o velocidad). ROS Control es ampliamente utilizado para controlar articulaciones dentro del entorno de ROS y cuenta con la ventaja que se puede integrar a Gazebo por medio de un plugin descrito dentro del modelo del robot.

Para lograr la flotabilidad de la embarcación es posible utilizar un plugin inherente del entorno de Gazebo. Similar al *FreeFloating Plugin*, el *Buoyancy Plugin* fue desarrollado para la simulación de objetos sumergidos en agua. Este plugin funciona calculando una fuerza de flotabilidad para cada eslabón del modelo al especificar la densidad del fluido en el que este está sumergido. El plugin funciona bien cuando el volumen de los objetos consiste en geometrías simples como esferas y cilindros. Para geometrías más complicadas, las cuales utilizan mallas, el plugin realiza una aproximación del volumen para poder calcular la fuerza de flotabilidad.

El *Buoyancy Plugin* se utiliza en conjunto con el *LiftDrag Plugin* para simular objetos bajo agua. Este fue desarrollado originalmente para simular las fuerzas de sustentación y arrastre presentes en las alas de las aeronaves. Para poder utilizar este plugin es necesario obtener ciertos valores de las curvas que relacionan el ángulo de ataque con el coeficiente de sustentación y las cuales se generan de forma experimental para cada perfil alar. Gazebo realiza ciertas simplificaciones importantes para poder simular estas fuerzas. La primera es que las curvas características de cada perfil alar se asumen como líneas rectas antes y después del ángulo de estancamiento para poder calcular su pendiente y obtener los datos necesarios para introducir en el plugin.

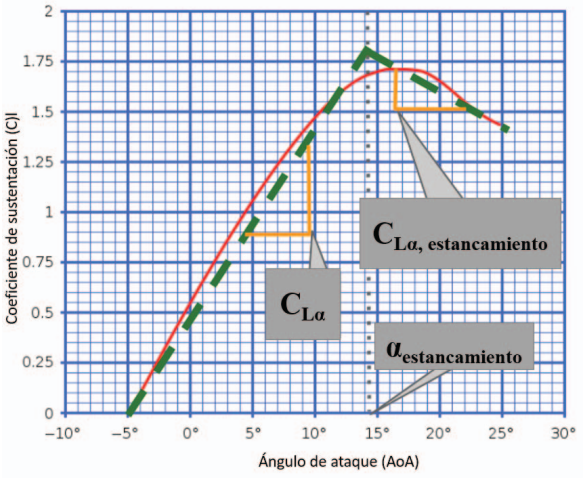


Fig. 3. Simplificación entre el ángulo de ataque y el C_L.

Otra simplificación importante es que el plugin toma la velocidad lineal del modelo como la velocidad del viento en el mundo. Esto se debe a que fue desarrollado para la simulación de aeronaves en condiciones sin viento. Por lo tanto, al implementar este plugin, el cálculo de la velocidad aparente del viento será parcialmente correcta debido a que no se está considerando la componente de velocidad real del viento.

Para complementar la implementación de los dos plugins mencionados anteriormente se hizo uso del entorno de simulación Virtual Robot X. El simulador Virtual Robot X, de aquí en adelante VRX, es una herramienta de desarrollo de propósito general y de fuente abierta con la capacidad de aproximar el comportamiento de vehículos de superficie no tripulados (USV) que operan en ambientes marinos complejos [28]. Este simulador fue desarrollado en la versión de Ubuntu 18.04 para Gazebo 9.

Las principales características que vuelven al simulador VRX una herramienta atractiva para este proyecto son sus capacidades de aproximación de fuerzas de flotabilidad para simular objetos flotantes y la representación estocástica de la

velocidad del viento y del oleaje para influenciar el movimiento de las embarcaciones. Además, posee una representación visual de la superficie acuática que incluye aproximaciones de reflexión y refracción. También se encontró que es posible incluir modelos adicionales a los ya existentes dentro de la simulación de forma relativamente sencilla. VRX utiliza el modelo de Fossen para vehículos marinos, el cual fue descrito en una sección anterior, para describir el movimiento de las embarcaciones dentro del entorno de simulación.

El plugin *USV Gazebo Dynamics Plugin* se desarrolló como una forma de aplicar las ecuaciones descritas con anterioridad de una forma conveniente para modelos de tipo USV en Gazebo. Para utilizarlo se debe declarar dentro del archivo URDF el eslabón que está en contacto con el agua, el nivel del agua, la densidad de la misma, la matriz de masa agregada, los términos de amortiguamiento lineal y cuadrático, así como el radio, ancho y longitud del bote. VRX utiliza como modelo estándar el Wave Adaptive Modular Vessel (WAM-V) y cuyos valores para la implementación del plugin se obtuvieron experimentalmente [36].

Además de poder simular las fuerzas hidrodinámicas por medio de este plugin, VRX contiene adicionalmente su propio plugin de viento llamado *USV Wind Plugin*. El entorno de simulación considera la velocidad total de viento como la suma de la velocidad media constante del viento y la velocidad del viento variable de media cero. A diferencia del *LiftDrag Plugin* descrito anteriormente, este plugin si toma en consideración las velocidades aparentes del viento, descritas por medio de sus componentes "x" y "y" en el marco de referencia del cuerpo. Una de las grandes ventajas de usar este plugin es que permite modificar las siguientes características del viento: dirección, velocidad media, desviación estándar y constante de tiempo. Esto permite realizar simulaciones con diferentes características de viento para un mismo modelo y también observar la velocidad instantánea del viento en tiempo real, ya que esta se publica como un tópico de ROS.

C. *Estrategia de control*

Un aspecto que complica el diseño y simulación de un sistema de control para un velero es que en la realidad estos están sujetos a condiciones cambiantes difíciles de replicar. Además, desde una perspectiva de control tradicional, el viento, el cual es el principal medio de propulsión del velero, se analiza como una perturbación [13]. Para el desarrollo del control y la autonomía de un USV, es necesario realizar una elección entre la complejidad de la simulación y la precisión de los resultados [36].

Sin embargo, las estrategias de control de veleros se basan en principios de funcionamiento relativamente sencillos. Si bien la propulsión de los veleros se logra por medio de una combinación de la fuerza de las velas, la fuerza de frenado del timón y una fuerza de fricción tangencial, el control de las velas es el principal enfoque. Para la navegación de veleros autónomos comúnmente se utiliza una estrategia de control específicamente para el ángulo de ataque de la vela rígida, es decir, se busca controlar el ángulo de la vela en relación con el viento. Las estrategias de control de vela más comunes utilizan solamente datos de viento aparente [11].

El conjunto mástil-vela puede presentar dos configuraciones distintas: la vela está unida de forma permanente al mástil o esta gira libremente alrededor de este. Si la vela está unida directamente al mástil, esta se mueve con la rotación de este. En el segundo caso, la vela funciona como una veleta de viento. Debido al modelado del conjunto mástil-vela para este velero, el primer caso es el de particular interés. Bastos [37] propone un lazo de control en el que se compara el ángulo de ataque deseado con el ángulo de ataque actual y la diferencia se pasa por un controlador PID que envía la señal al actuador para lograr el ángulo de ataque deseado.

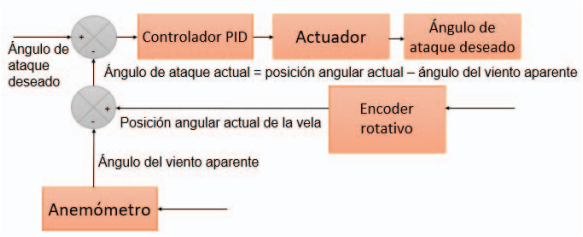


Fig. 4. Estrategia de control en base al ángulo de ataque.

Esta propuesta se vuelve bastante atractiva debido a que su implementación se hace posible ya sea por medio de herramientas proporcionadas por ROS, como es el caso de *rqt_gui*, o por medio de un script en un lenguaje de programación que utiliza librerías para simular controladores PID, como es el caso de Python. El valor del ángulo de ataque deseado se vuelve el setpoint del lazo de control y el valor del ángulo de ataque actual se puede obtener por medio de un nodo que lo publica en ROS.

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El velero final se compone de 5 diferentes elementos los cuales fueron modelados por medio de Fusion 360 e implementados como archivos de tipo COLLADA en el archivo de descripción URDF. Estos son: un casco, un mástil, un cilindro para girar el timón, una pala del timón y una vela modelada a partir de un perfil alar determinado. El conjunto vela-mástil funciona por medio de una articulación de revoluta, lo que permite cambiar el ángulo de ataque de la vela utilizando mensajes por medio de ROS Control. La misma configuración se utilizó para el sistema del timón.

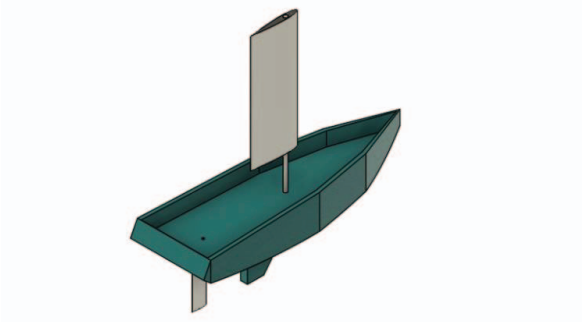


Fig. 5. Modelo del velero.

Inicialmente se trabajó con un perfil NACA 0012, obteniendo los valores necesarios para implementar el *LiftDrag Plugin* para este perfil específico. Sin embargo, otros perfiles como el EPPLER 473 se probaron posteriormente.

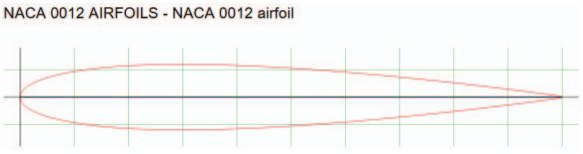


Fig. 6. Perfil alar NACA 0012 utilizado para la vela.

El paquete final del velero robótico se compone de un archivo de descripción en formato URDF que contiene los elementos mencionados anteriormente, así como sus respectivas articulaciones. Adicionalmente se implementaron de forma exitosa diferentes sensores dentro de los que se incluyen: una unidad de medición inercial, un GPS, un sensor de fuerza en la base del mástil y una cámara en la punta de este. Todos estos provenientes de diferentes paquetes de ROS.

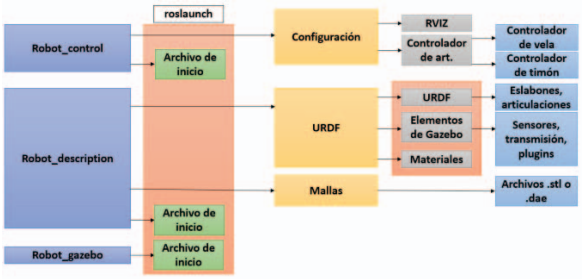


Figura 7. Paquete del velero robótico.

Adicionalmente, se implementaron los 4 diferentes plugins para interactuar con el entorno. El *Buoyancy Plugin* en conjunto con el *LiftDrag Plugin* permiten simular la sustentación y el arrastre que genera la vela al moverse. El *USV Gazebo Dynamics Plugin* permite a la embarcación flotar sobre la superficie acuática siempre y cuando los valores de la matriz de arrastre lineal y de la matriz de arrastre cuadrática del que hace uso el plugin se conozcan. Finalmente, el *USV Wind Gazebo Plugin* permite establecer una velocidad y dirección del viento cuando inicia la simulación, lo que genera movimiento en la embarcación.

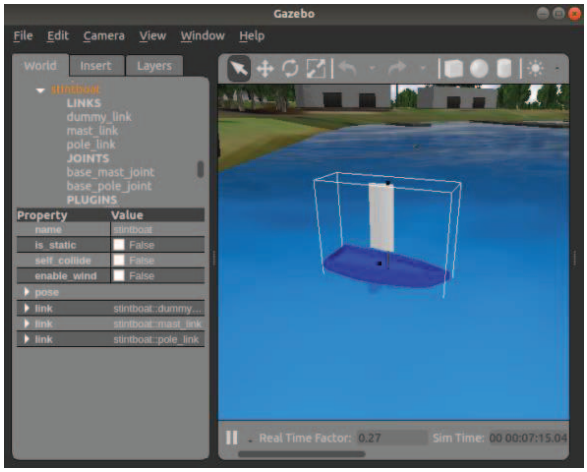


Fig. 8. Velero robótico en Gazebo.

La implementación de ROS Control se logró por medio de un archivo de configuración que contiene los controladores para las articulaciones del sistema mástil-vela y del timón. Este archivo permite enviar mensajes para cambiar la posición de las articulaciones en radianes. Además, por medio de la interfaz de *rqt_gui* en conjunto con ROS Control, fue posible enviar la señal a las articulaciones para simular el lazo de control descrito. Esta señal consiste en el ángulo de ataque deseado. El resultado es que la articulación recibe la señal y mueve el sistema-mástil vela en función del ángulo de ataque.

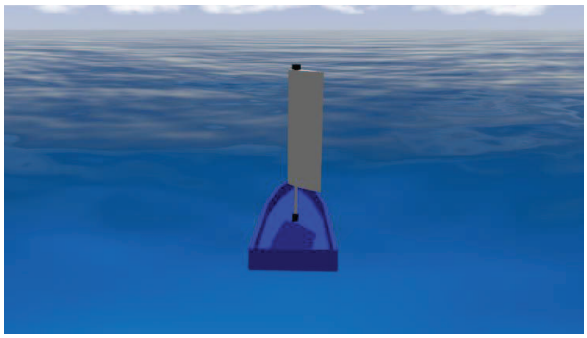


Figura 9. Simulación del velero en Gazebo con configuración de vela en un ángulo de ataque de 45°.

Inicialmente, los valores del PID eran de 0 y fueron siendo variados por medio del configurador dinámico de *rqt_gui* hasta llegar a valores que dieron buenos resultados. Finalmente, se utilizaron valores de 100 para la parte proporcional, 0.01 para la parte integral y 10 para la parte derivativa del controlador. El controlador dio buenos resultados para 4 diferentes ángulos de ataque que fueron probados: 30°, 45°, 60° y 90°.

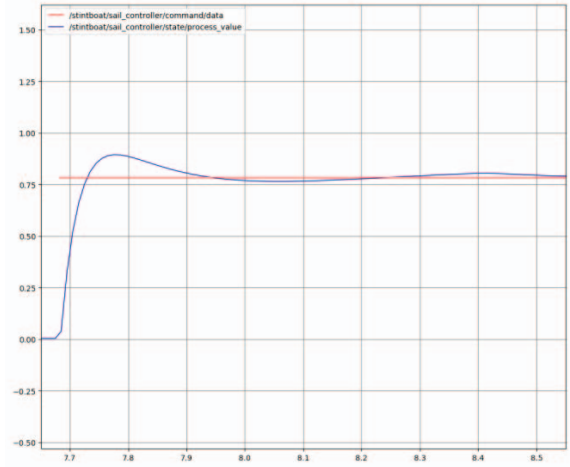


Fig. 10. Movimiento de la vela de un ángulo de ataque de 0° a un ángulo de ataque de 45° por medio del lazo de control con el controlador PID.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se concluye que la mayoría de los elementos de sistema de control y los fenómenos que afectan el funcionamiento de un velero robótico pueden ser simulados por medio de ROS-Gazebo, aunque en algunos casos se tienen ciertas limitaciones de representación. Las mayores dificultades se encontraron al momento de simular la interacción de la embarcación con el entorno. Si bien es posible simular la flotabilidad del velero por medio del *USV Gazebo Dynamics Plugin*, este requiere datos experimentales con los que no se contaba, por lo que se hizo uso de valores modificados del WAM-V. De igual forma, el *LiftDrag Plugin* no considera la velocidad aparente del viento dentro de sus cálculos, por lo que fue necesario complementar con el *USV Wind Gazebo Plugin*. Este último tiene la limitante que solo permite establecer un eslabón que es afectado por el viento, por lo que se seleccionó solamente la vela y, por lo tanto, en esta recae la totalidad de la generación de movimiento en la embarcación.

Sin embargo, a pesar de todas las limitaciones, el entorno de simulación construido cumple con su propósito. Por medio del acoplamiento de 5 diferentes perfiles alares con relaciones de arrastre-sustentación variados, se pudo hacer una comparación de la velocidad lineal resultante de la embarcación. Los resultados dentro de la simulación muestran que la velocidad lineal de la misma depende del perfil alar seleccionado, tal y como sucede en un entorno real. Los perfiles con los que se hicieron las pruebas fueron: NACA 0012, NACA 0018, EPPLER 473, E169 y NACA 63(3)-018.

A futuro se planea incorporar la interacción del timón con las fuerzas hidrodinámicas que lo afectan y también mejorar los valores de los parámetros que rigen el comportamiento del casco del velero con el entorno.

V. Referencias

[1] C. Pêtres, M.-A. Romero-Ramirez y F. Plumet, «Reactive path planning for autonomous sailboat,» de *The 15th International Conference on Advanced Robotics*, Tallin, 2011.

[2] R. Stelzer y K. Jafarmadar, «History and Recent Developments in Robotic Sailing,» 2011.

[3] C. Strömbeck, «Modeling, Control and Optimal Trajectory Determination for an Autonomous Sailboat,» 2017.

[4] F. Le Bars y L. Jaulin, «An Experimental Validation of a robust Controller with the VAIMOS Autonomous Sailboat,» WRSC/IRSC, 2012.

[5] O. Ménage, A. Bethencourt, P. Rousseaux y S. Prigent, «VAIMOS: Realization of an Autonomous Robotic Sailboat,» Springer, 2014, pp. 25-36.

[6] C. Viel, U. Vautier, J. Wan y L. Jaulin, «Position keeping control of an autonomous sailboat,» IFAC Conference Paper Archive, Plymouth, 2018.

[7] H. S. Stenersen, «Construction and Control of an Autonomous Sail Boat,» *IFAC-Papers Online,* vol. 49, nº 23, pp. 524-531, 2016.

[8] SailBot, «International Robotic Sailing Regatta,» 2022. [En línea]. Available: https://www.sailbot.org/wp-content/uploads/2017/06/Class-Rules-2014.pdf.

[9] WRSC&IRSC, «World Robotic Sailing Championship 2019,» [En línea]. Available: https://www.roboticsailing.org/2019/rules/.

[10] The Microtransat Challenge, [En línea]. Available: https://www.microtransat.org/rules.php.

[11] L. Giger, S. Wismer, S. Boehl, G.-A. Büsser, H. Erckens, J. Weber, P. Moser, P. Schwizer, C. Pradalier y R. Siegwart, «Design and Construction of the Autonomous Sailing Vessel AVALON,» de *Proceedings of the World Robotic Sailing Championship and International Robotic Sailing Conference*, Matosinhos, 2009.

[12] R. Stelzer y T. Pröll, «Autonomous sailboat navigation for short course racing,» *Robotics and Autonomous Systems,* vol. 56, nº 7, pp. 604-614, 2008.

[13] J. Melin, K. Dahl y M. Waller, «Modeling and Control for and Autonomous Sailboat: A Case Study,» Springer.

[14] H. Saoud, M.-D. Hua, F. Plumet y F. B. Amar, «Routing and course control of an autonomous sailboat,» de *European Conference on Mobile Robots (ECMR)* , Paris, 2015.

[15] J. Abril, J. Salom y O. Calvo, «Fuzzy control of a sailboat,» *International Journal of Approximate Reasoning,* vol. 16, nº 3-4, pp. 359-375, 1997.

[16] P. Krishnamurthy, F. Khorrami y S. Fujikawa, «A Modeling Framework for Six Degree-of-Freedom Control of Unmanned Sea Surface Vehicles,» de *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, Sevilla, 2005.

[17] N. A. Cruz y J. C. Alves, «Auto-Heading Controller for and Autonomous Sailboat,» de *OCEANS'10 IEEE*, 2010.

[18] R. M. Wilson, «The Physics of Sailing,» Boulder, Colorado, 2010.

[19] M. Silva, B. Malheiro, P. Guedes y P. Ferreira, «Airfoil Selection and Wingsail Design for an Autonomous Sailboat,» de *Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*, 2019.

[20] K. Ghosh y P. C. Shukla, «Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships,» *International Journal of Civil and Environmental Engineering,* pp. 75-80, 2009.

[21] M. Silva, A. Friebe, B. Malheiro, P. Guedes y P. Ferreira, «Rigid wing sailboats: A state of the art survey,» *Ocean Engineering,* vol. 187, 2019.

[22] P. Kerdraon, «Design and models optimisation of a sailing yacht dynamic simulator,» 2017.

[23] T. I. Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, Wiley, 2021.

[24] A. W. Browning, «A mathematical model to simulate small boat behaviour».

[25] A. Kouba, «3.1 Robot Operating System (ROS),» de *Robot Operating System (ROS) The Complete Reference (Volume 3)*, Springer, 2017.

[26] Y. Pyo, H. Cho, R. Jung y T. Lim, «Introduction to ROS,» de *ROS Robot Programming* , 2017, pp. 10-13.

[27] N. Koening y A. Howard, «Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, 2004.

[28] B. Bingham, C. Agüero, M. McCarrin, J. Klamo, J. Malia, K. Allen, T. Lum, M. Rawson y R. Waqar, «Toward Maritime Robotic Simulation in Gazebo».

[29] T. Thosik, J. Schwinghammer, M. J. Feldvoß, J. P. Jonte, A. Brech y E. Maehle, «MARS: A simulation environment for marine swarm robotics and environmental monitoring,» de *OCEANS 16*, Shanghai, 2016.

[30] E. H. Henriksen, I. Schjølberg y T. B. Gjersvik, «UW MORSE: The underwater Modular Open Robot Simulation Engine,» de *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, Tokyo, 2016.

[31] T. Watanabe, G. Neves, R. Cerqueira, T. Trocoli, M. Reis, S. Joyeux y J. Albiez, «The Rock-Gazebo Integration and a Real-Time AUV Simulation,» de *2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR)*, Uberlandia, 2015.

[32] K. J. DeMarco, M. E. West y A. M. Howard, «A computationally-efficient 2D imaging sonar model for underwater robotics simulations in Gazebo,» de *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, Washington, 2015.

[33] M. Manhães, S. Scherer, M. Voss, L. R. Douat y T. Rauschenbach, «UVV Simulator: A Gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation,» de *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, 2016.

[34] Gazebo, «URDF in Gazebo,» [En línea]. Available: https://classic.gazebosim.org/tutorials?tut=ros_urdf&cat=connect_ros.

[35] E. I. Sarda, H. Qu, I. R. Bertaska y K. D. von Ellenrieder, «Station-keeping control of an unmanned surface vehicle exposed to current and wind disturbances,» *Ocean Engineering,* vol. 127, pp. 305-324, 2016.

[36] J. Malia, «Modeling of a dynamic wave environment for unmanned surface vessel control,» Monterey, 2018.

[37] A. C. Bastos Miranda, «Modelação, Simulação e Controlo de um Veleiro com Vela Asa,» Porto, 2021.

Human Gait Analysis using Inertial Sensors and Preliminary Experimental Design

Análisis de la Marcha Humana utilizando Sensores Inerciales y Diseño Experimental Preliminar

José Mendoza
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
jose.mendoza13@utp.ac.pa

Héctor Montes
Centro de Automática y Robótica
Consejo Superior de Investigaciones Científicas en España
Madrid, España
hector.montes1@utp.ac.pa

Félix Henríquez
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
felix.henriquez@utp.ac.pa

***Abstract*— This paper presents a review of the state of the art according to the analysis of human gait in people with some kind of impairment in their movement and considering people with visual impairment. A review of the literature on experimental design methodologies for the analysis of human gait using inertial sensors and the most relevant biomechanical gait parameters is presented and described. In addition, the results of a preliminary experimental test are presented using inertial sensors on a normally sighted subject, who walked in a straight line for a distance of 20 meters in total, with a 180° turn at 10 meters distance, to return to the point of origin. This experimental test was carried out twice, the first time with the person with normal vision (CV) and the second time with the person blindfolded, i.e., without vision (SV), in order to simulate the gait of a person with visual impairment. The gait analysis was carried out with the graphs obtained, as they revealed significant differences between one experiment and the other.**

Keywords — inertial sensors, gait analysis, locomotion, methodology, biomechanical parameters.

***Resumen* — En este trabajo se presenta la revisión del estado del arte de acuerdo al análisis de la marcha humana en personas con alguna afectación en su desplazamiento y considerando a personas con discapacidad visual. Se presenta y describe una revisión de la literatura sobre las metodologías de los diseños experimentales para el análisis de la marcha humana utilizando sensores inerciales y los parámetros biomecánicos más relevantes de la misma. Además, se presentan los resultados de un ensayo experimental preliminar utilizando sensores inerciales sobre un individuo con visión normal, el cual ejecutó una marcha en línea recta a una distancia de 20 metros en total, con un giro de 180° a los 10 metros de distancia, para retornar a su punto de origen. Esta prueba experimental fue realizada dos veces, la primera con la persona con visión normal (CV) y la segunda con la persona con los ojos vendados, esto es, sin visión (SV), con la finalidad de simular la marcha de una persona con discapacidad visual. El análisis de la marcha se realizó con las gráficas obtenidas, ya que mostraron diferencias significativas entre una y otra experimentación.**

Palabras claves — sensores inerciales, análisis de la marcha, locomoción, metodología, parámetros biomecánicos

I. Introduction

Las soluciones tecnológicas a través del uso de dispositivos electrónicos han representado una amplia gama de soluciones para el análisis y evaluación de distintos sistemas, en este sentido los sensores de medición inercial también denominados unidad de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés *Inertial Measurement Unit*) son uno de ellos [1]. En los últimos años estos sensores se han convertido en un sistema de captura de datos cinemáticos en distintas áreas de las ciencias ingenieriles y médicas, en este último caso, para el análisis de movimiento en diferentes áreas de la biomecánica en seres humanos [2], siendo el análisis de la marcha humana uno de ellos [3]. Los sensores inerciales presentan ventajas significativas por encima de los sistemas ópticos de captura de movimiento, ya que este último, está limitado a ser utilizados en laboratorios y son muy costosos, al contrario, los sensores inerciales se pueden utilizar en cualquier ambiente, manteniendo una alta exactitud y precisión en la captura de movimientos y el costo de estos dispositivos son más económico en comparación con los sistemas ópticos [4].

El ser humano realiza múltiples movimientos diarios para realizar diferentes actividades que producen su desarrollo integral, uno de los movimientos corporales más básicos y necesarios es la caminata o marcha bípeda, lo cual permite que las personas tengan desplazamientos de un lugar a otro [5]. Aunque la marcha difiere por diferentes factores, por ejemplo, el tipo de terreno, edad, embarazo, personalidad, patologías, etc., pero en la gran mayoría de los casos la marcha se ve influida principalmente por patologías. Por lo tanto, analizar la marcha humana juega un papel importante cuando se ve afectada esta facultad para desplazarse de un lugar a otro, en menor o mayor medida, por enfermedades o discapacidades que alteran la movilidad de los individuos [6]. Además, el estudio y análisis de la marcha humana también presenta un abanico de oportunidad para la detección de enfermedades tempranas en diferentes etapas de vida del ser humano, o después de alguna intervención médica, en donde los procesos de rehabilitación fisioterapéutica en pacientes son aplicados para mejorar anomalías en la marcha y movimientos corporales [7].

Este artículo tiene como objetivo identificar, analizar y sintetizar los enfoques dentro de las metodologías de los diseños experimentales utilizados en diferentes centros de investigación para el análisis de la marcha humana y los parámetros más utilizados en estos estudios. La sección 2 comprende la metodología utilizada para revisión de literatura y la descripción del ensayo experimental preliminar realizado por los autores. La sección 3 contiene un análisis de la marcha humana de los resultados obtenidos por otros investigadores. En la sección 4 presentamos los resultados obtenidos en las

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco de los proyectos APY-NI-2021-41 y FID-2021-131, financiados por la SENACYT.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00115

pruebas experimentales preliminares realizados en nuestro laboratorio y en la sección 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas.

II. METODOLOGÍA

A. Revisión de la literatura

Principalmente, la revisión de la literatura tuvo el enfoque de analizar las metodologías de los diseños experimentales utilizados en diferentes centros de investigación para la evaluación de la marcha en personas con o sin algún tipo de discapacidad locomotriz utilizando sensores inerciales. Además, se tuvo especial interés en los parámetros biomecánicos utilizados en cada uno ellos.

Se realizó una búsqueda exhaustiva en la literatura científica teniendo en cuenta, principalmente, que fueran trabajos relevantes de los últimos cinco años y enfocándolos en palabras clave como, sensor inercial, análisis de la marcha humana, locomoción humana, metodología experimental de la marcha humana, y parámetros biomecánicos, entre otros. En la Fig. 1 se presenta un diagrama de flujo que resume el proceso de la revisión del estado del arte.

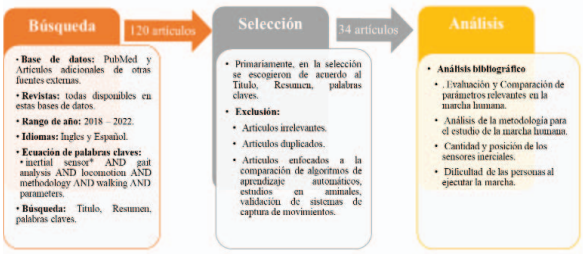


Fig. 1. Diagrama de flujo de la búsqueda, selección, análisis de la revisión de la literatura. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron criterios estrictos de inclusión y exclusión para seleccionar los trabajos que tienen mayor relevancia para el desarrollo que estamos realizando en nuestro proyecto de investigación, que es en donde se enfoca este artículo. En la Tabla 1 se resume los factores más relevantes de 20 trabajos de investigación revisados en la literatura, considerando el diseño experimental y los parámetros biomecánicos en cada evaluación de la marcha humana utilizando sensores inerciales. Los factores utilizados fueron: tipo de discapacidad o enfermedad, ya que este es el criterio que compete en este artículo, velocidad de la marcha especificando la distancia recorrida por la persona, así como también la inclusión de giros en 180°, cantidad y modelo del sensor inercial utilizado y los parámetros biomecánicos considerados de la marcha humana. Por último, se realizó una discusión en base a los factores involucrados en el diseño experimental, además, se abordaron otros factores como la ubicación de los sensores en el cuerpo, las técnicas de análisis estadísticos utilizados, cantidad de personas para validar el estudio, entre otros.

B. Pruebas Experimentales Preliminares

1) Protocolo

Dentro del marco de nuestro estudio, se realizó un ensayo experimental para medir los parámetros cinemáticos de cada extremidad del cuerpo humano. En este sentido, se realizó una caminata de 20 metros con un giro de 180° en el intermedio, es decir, el participante camino 10 metros desde su un punto inicial hasta un punto de medio recorrido, allí hace un giro de 180° para regresar al punto inicial, completando 20 metros mencionados anteriormente. Se realizó esta actividad ya que la marcha con giros de 180° es una actividad básica cotidiana que las personas ejecutan dentro de interiores de edificios, sin embargo, puede ser algo complejo o complejo para personas con alguna discapacidad.

2) Sensores inerciales y ubicación

Esta prueba se realizó sobre un solo individuo dos veces, la primera con los ojos abiertos y la segunda con los ojos cerrados. Esta última condición se realizó para simular la marcha de una persona con discapacidad visual (entendiendo que es solo una aproximación y no un caso real). Para realizar la caminata con los ojos cerrados, otra persona le avisaba que había llegado al punto final para retornar al punto inicial con el giro de 180° a medio recorrido. Para esta prueba se utilizó un sistema de sensores inerciales y magnéticos Xsens MTw Awinda, que contiene 17 seguidores de movimiento magnético-inercial inalámbrico en miniatura para aplicaciones cinemáticas 3D de alta precisión en tiempo real. En el estudio presentado en [8], utilizando los sensores Xsens MTw Awinda, se capturaron y evaluaron los movimientos cinemáticos de ambas piernas del individuo, recolectando información del giroscopio de velocidad 3D y del acelerómetro 3D de cada sensor inercial. Estos sensores se integran en un módulo pequeño inalámbrico, y seis de estos módulos inerciales fueron distribuidos en partes específicas del cuerpo humano desde la cabeza hasta los pies. En la Fig. 2 se presenta la colocación general de los 17 sensores sobre el cuerpo humano, tomando como ejemplo los que se tienen en el laboratorio del centro de investigación de los autores de este trabajo.

Adicionalmente, estos sensores cuentan con un rango de alcance de medición de hasta 20 metros de distancia, midiendo más de 12 parámetros inerciales, los cuales son, la velocidad angular en 3D, la aceleración en 3D, la aceleración libre en 3D, los ángulos de Euler, los cuaterniones, presión, entre otros. Tienen la capacidad de medir estos parámetros en diferentes tasas de frecuencia dependiendo de la configuración y de la cantidad de sensores utilizados a la vez, por ejemplo, 40 Hz, 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 120 Hz [9]. En este caso particular, se utilizó una tasa de frecuencia para la captura de los parámetros inerciales de 40 Hz, lo que representa un muestreo de 0.025 segundos, por lo tanto, cada segundo obtenemos 40 mediciones del parámetro inercial seleccionado, que es una cantidad de datos suficiente para las pruebas experimentales que se han realizado.

Fig. 2. Distribución y ubicación en el cuerpo humano de los 17 sensores inerciales del equipo MTw Awinda Xsens. Fuente: Elaboración propia.

TABLA I. RESUMEN DE LOS FACTORES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL Y PARÁMETROS GENERALES INVOLUCRADOS EN EL ANÁLISIS DE LA MARCHA EN LOS ARTÍCULOS DE ESTA REVISIÓN.

Primer autor [referencia], año	**Cantidad de sensores**	**Parámetros**	**Tipo de discapacidad / enfermedad**	**Movimientos ejecutados (distancia recorrida)**	**Modelo de sensor (Marca)**
Carlotta Caramia [10], 2017	8	Espaciotemporales Rango de movimiento	Parkinson	Caminata a velocidad autoseleccionada (15 metros).	Tech-MCS (Technaid)
Matilde Bertoli [11], (2018)	1	Espaciotemporales	Ancianos sanos, Parkinson y marcha coreica, Hemiparesia	Caminata en velocidad normal y rápida (12 metros).	Opal (APDM Inc.)
Petros Ismailidis [12], (2021)	7	Espaciotemporales Cinemáticos	Osteoartritis en rodillas	Caminata a diferentes velocidades (20 metros).	RehaGait (Hasomed)
Petros Ismailidis [13], (2020)	7	Espaciotemporales Cinemáticos	Osteoartritis en rodillas	Caminata a velocidad autoseleccionada (20 metros).	RehaGait (Hasomed)
Valeria Rosso [14], (2019)	7	Espaciotemporales Articulaciones cinemáticas	Obesidad	Caminata a velocidad autoseleccionada (14 metros).	TSDN121 (ATR Promotions)
Ewa Gieysztor [15], (2021)	1	Espaciotemporales Rango de movimiento de la pelvis	Sin discapacidad / Enfermedad	Caminata a velocidad autoseleccionada (20 metros).	G-Sensor® (BTS Bioengineering)
Lilian Genaro Motti Ader [16], (2021)	2	Espaciotemporales	Sin discapacidad / Enfermedad	Caminata a velocidad autoseleccionada (30 metros).	SHIMMER™ (Shimmer Research Ltd)
Guillermo García-Villamil [17], (2021)	1	Espaciotemporales	Sin discapacidad / Enfermedad	Caminata a velocidad autoseleccionada en 30 minutos (sin distancia especifica).	G-STRIDE (Fabricación propia de los autores)
Sen Qiu [18], (2020)	8	Rango de movimiento del tobillo Cinemáticos Simetría de la marcha (postura)	Derrame Cerebrovascular	Caminata a velocidad autoseleccionada en 15 minutos (sin distancia especifica).	Fabricación propia de los autores
Ayumi Tanigaw [19], (2018)	1	Cinemáticos	Dolor lumbopélvico	Caminata a velocidad autoseleccionada (14 metros).	MVP-RF-8, (MicroStone Co.)
Cecilia Raccagni [20], (2018)	2	Espaciotemporales	Parkinson	Caminata a velocidad autoseleccionada (10 metros).	SHIMMER 2™ (Shimmer Research Ltd
Ramon J. Boekesteijn [21], (2021)	4	Espaciotemporales Rango de Movimientos en los tres planos anatómicos	Osteoartritis en rodillas y cadera	Caminata a velocidad autoseleccionada con giros de 180° (6 metros).	Opal V2 (APDM Inc.)
J. Soulard [22], (2021)	2	Espaciotemporales	Sin discapacidad / Enfermedad	Caminata a velocidad autoseleccionada (10 metros).	Physilog5 (Gait Up)
Nina Lefeber [23], (2019)	2	Espaciotemporales	Derrame Cerebrovascular	Caminata a velocidad autoseleccionada (12 metros).	Physilog5 (Gait Up)
Pier Paolo Panciani [24], (2018)	1	Espaciotemporales	Pacientes con hidrocefalia de presión normal idiopática	Caminata a velocidad autoseleccionada (10 metros).	G-Sensor® (BTS Bioengineering)
Stephanie Voss [25], (2020)	6	Espaciotemporales de marcha y de giro	Sin discapacidad / Enfermedad	Caminata a velocidad autoseleccionada y caminata a velocidad rápida sin correr (25 metros).	Opal (APDM Inc.)
Ilaria Mulas [26], (2020)	1	Espaciotemporales	Discapacidad cognitiva	Caminata a velocidad autoseleccionada (30 metros).	G-Sensor® (BTS Bioengineering)
Robbin Romijnders [27], (2021)	1	Contacto con el pie inicial y final	Parkinson y Derrame Cerebrovascular	Caminata en línea recta (5 metros). Caminata en forma curvada (5 metros). Caminata en circuito circular, pero realizando dos tareas a la vez (5 metros).	myoMOTION™ (Noraxon)
Corinna N. Gerber [28], (2019)	5	Espaciotemporales Rango de movimientos de rodillas Simetría de la marcha (postura)	Parálisis cerebral	Todas las actividades locomotrices realizadas por los niños en el día durante 10 horas (sin distancia especifica).	Physilog4 (Gait Up)
Anjali Gera [29], (2019)	6	Cinemáticos Espaciotemporales	Parkinson	Caminata a velocidad autoseleccionada con giro de 180° (14 metros).	Opal (APDM Inc.)

III. Análisis de la Marcha Humana

En esta sección se llevará a cabo un análisis de la marcha humana, de acuerdo con los factores en común entre los resultados de las investigaciones revisadas, las consideraciones especiales de algunos de ellos, así como también los parámetros que han utilizado.

A. Análisis de la metodología y resultados en el estudio de la marcha humana

En los últimos cinco años, las investigaciones sobre el análisis de la marcha humana se han enfocado en personas con algún tipo de afectación en su desplazamiento, ya sea, por algún tipo de discapacidad, enfermedad o condición física, que provoca una marcha atípica en estas personas. En el caso de nuestra revisión, los principales análisis que se han considerado han sido en pacientes con Parkinson [10][11][20][27][29], Osteoartritis en rodillas y cadera [12][13][21], y en personas que han sufrido derrames cerebrovasculares [18][23][27]. Por otro lado, las personas adultas mayores han sido los principales participantes en las pruebas experimentales para los diferentes análisis de la marcha, ya que las afectaciones antes mencionadas se desarrollan comúnmente en estas edades. En el caso de los niños y jóvenes adultos, los análisis de la marcha realizados en estas personas se utilizaron principalmente para establecer fundamentos para crear una normativa que permita detectar marchas atípicas y algunos tipos de enfermedades en edades tempranas. En cuanto a la cantidad de personas que participaron en las investigaciones fue muy variada, aunque en la gran mayoría participaron entre 40 y 60 personas, dentro de esta cantidad se tomaba la mitad para personas sanas y la otra para las personas con algún tipo de afectación.

En la mayoría de los análisis participaron personas sanas como control, para observar que tanta diferencia existe con respecto a las personas con algún tipo de afectación en su marcha, aunque en Voss [25] y en Gieysztor [15] solo participaron personas sanas ya que el objetivo de ellos fue establecer una marcha de referencia para detectar marchas anormales, en el caso de Soulard [22] solo participaron personas sanas porque el objetivo fue evaluar la confiabilidad de los sensores inerciales fuera de entornos controlados como laboratorios y, por otro lado, en Motti [16] solo participaron personas sanas con el propósito de evaluar cuántos ciclos de la marcha son necesarios para valores de parámetros biomecánicos confiables y representativos. En este último sentido, de confiabilidad de los datos, no se halló dentro de los artículos revisados, análisis sobre la cantidad de personas mínima como muestra representativa de la población estudiada. Cabe destacar que en todos los artículos revisados se realizaron diferentes comparativas de la marcha, aun en los estudios en donde solamente se analizó la marcha en personas sanas, ya que compararon la marcha realizada entre diferentes grupos de edades o sexo.

Con relación al tipo de actividad realizada en la gran mayoría de los estudios revisados, los participantes efectuaron caminatas en línea recta, a una distancia promedio de 20 metros en sus pruebas experimentales, a una velocidad autoseleccionada por la persona. En otros casos, la caminata fue realizada a una velocidad configurada en caminadoras [11][12][25]. En algunos de estos estudios se agregaban giros de 180° y 90° [27][28][29]. Esto es así, porque la marcha humana se realiza comúnmente en línea recta, la distancia recorrida va depender de los parámetros biomecánicos de interés en el análisis de la marcha, por ejemplo, Villamil [17] y Qiu [18] realizaron la marcha en línea recta sin una distancia especifica, sino que los participantes realizaron la marcha en un tiempo específico. Para el caso de Villamil [17] fue de 30 minutos y en el caso de Qiu [18] fue de 15 minutos, ya que ambos tenían el objetivo de evaluar un sistema de medición biomecánico portátil de la marcha humana. Por otra parte, Gerber [28] midió los parámetros de la marcha de todas las actividades locomotrices diarias en niños durante 10 horas al día.

La cantidad de sensores utilizados en estas investigaciones fue muy variada, aunque mayormente se utilizó un solo sensor inercial, pero ubicados en distintas partes del cuerpo, por ejemplo, Bertoli [11] ubicó el sensor en el tobillo y Tanigaw [19], Panciani [24] y Mulas [26] lo ubicó en la zona lumbar de la columna o parte baja de la espalda, aunque la máxima cantidad de sensores inerciales utilizados fue de 8 en Caramia [10] y Qiu [18] distribuidos en ambas piernas y en la parte baja de la espalda. Cabe destacar que los estudios en donde se utilizaron un solo sensor ubicado en la columna lumbar se debieron al enfoque en el análisis de la marcha postural y equilibrio de esta, y no en otras características de la marcha, por ejemplo, fases o ciclo de la marcha. En el caso de la configuración de la frecuencia de muestreo de los sensores inerciales en todas las investigaciones revisadas se utilizó una frecuencia de muestreo de 100 Hz en adelante. Los autores explican que esto debido a la obtención de una mayor cantidad de datos por lo que se tendría una mejor representación de las señales adquiridas. No obstante, los movimientos del ser humano durante la marcha poseen un componente máximo de frecuencia de 20 Hz, con lo cual, se pueden tener configuraciones de 40 Hz de muestreo al momento de analizar la marcha humana [30].

B. Evaluación y Comparación de Parámetros Relevantes en la Marcha Humana

En el análisis biomecánico de la marcha, se utilizan diferentes tipos de parámetros, los cuales son espaciales, temporales, angulares, de fuerza, entre otros [31]. Por otro lado, los sensores inerciales están compuestos de acelerómetros, giroscopio y magnetómetros, por lo que solo pueden medir parámetros cinemáticos, por ejemplo, velocidad angular, aceleración, ángulos de Euler, etc. [7]. Los parámetros de la marcha en los que se enfoca este estudio son aquellos que puede ser medidos directa o indirectamente con sensores inerciales, los cuales, como se ha mencionado, son parámetros cinemáticos y espaciotemporales. Los parámetros espaciotemporales se obtienen en base a los parámetros cinemáticos, los cuales describen diferentes aspectos de la marcha como la velocidad de caminata, la longitud del paso, el tiempo del paso, etc.

Los paramentos espaciotemporales se pueden dividir en parámetros espaciales (parámetros de distancia) que son la longitud del paso y la zancada, etc., y los parámetros temporales se pueden dividir en la cadencia, la velocidad de la marcha, tiempo de apoyo de uno de los pies, y el tiempo de traslación del otro pie. Por otro lado, los parámetros cinemáticos, como es conocido, describen las posiciones, velocidades, y ángulos de los elementos que conforman cuerpo, en este caso, en donde están implementados los sensores inerciales [5]. Los rangos de movimientos son la diferencia entre el ángulo máximo y mínimo de los planos anatómicos del cuerpo, esto dependerá de cuál de los tres planos anatómicos estemos analizando, es decir, el plano

sagital, el frontal y el transversal, entre dos segmentos articulares adyacentes. Para el caso de la rodilla, conocer el ángulo que ella tiene durante el desplazamiento, se tendría que obtener los ángulos de la parte superior e inferior de la rodilla, esto es, el ángulo que conforma el muslo y la pantorrilla, con referencia a un sistema de coordenadas, para calcular el rango de movimiento en la rodilla [10]. Este tipo de parámetros biomecánico se utilizó en aquellos trabajos con personas con enfermedad de Parkinson, Osteoartritis en rodillas y derrame cerebrovasculares [13][18][14].

IV. Experimentación y Resultados

Según Alemán [32], Da Silva [33] y Timmis [34] las personas con discapacidad visual (PcDV) presentan diferencias significativas al compararlos con personas con visión normal, ya que las primeras caminan de manera más cautelosa y lenta debido que, al no contar con la facultad de observar el entorno al que se enfrentan, ya sean desniveles, obstáculos de diferentes alturas, etc., su mecanismo de defensa ante lo desconocido es reducir la longitud y velocidad del paso. En vista a lo anterior, se propone un estudio y análisis de la marcha en PcDV utilizando sensores inerciales a través del proyecto APYNI-2021-41 financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), ya que en la literatura se ha llevado a cabo con otros dispositivos electrónicos que solo pueden ser utilizados en ambientes controlados, como por ejemplo, sistemas ópticos a través de cámaras y plataformas de fuerzas, lo cual limita evaluación y caracterización de la marcha en PcDV en otros entornos con diferentes condiciones. Por lo tanto, se considera que la propuesta presentada en este proyecto, utilizando sensores inerciales, proporcionará nuevos resultados que podrán contribuir al estado del arte.

Para este ensayo se analizó la marcha humana a través de parámetros cinemáticos, específicamente ángulos de Euler o de Tait-Bryan, los cuales son balanceo (en inglés *Roll*), cabeceo (en inglés *Pitch*) y guiñada (en inglés *Yaw*), para el visualizar el desfase entre ambas marchas. Así como también la velocidad angular y la aceleración para observar la rapidez entre ambas marchas. Esto solo se analizó para ambos pies del individuo durante la experimentación. Se pudieron observar algunas diferencias en la velocidad angular que hubo en la marcha con visión CV (persona sin el antifaz) con respecto al marcha sin visión SV (persona utilizando el antifaz), evaluado para el pie derecho. Para el caso CV, en la Fig. 3 se observa que la velocidad angular tuvo un promedio mayor en su magnitud y con un ritmo más constante, con respecto a la evaluación de este mismo parámetro en el caso SV mostrado en la Fig. 4.

Se debe recordar que la experimentación se basó en una caminata de 20 metros en línea recta, 10 metros en un sentido y los otros 10 metros en el sentido contrario, después de hacer un giro de 180º. Si se observa la Fig. 3 se puede notar que en el tiempo de 15 s hay una disminución en la velocidad angular en el eje Z, con lo cual se puede intuir que la persona se ha detenido y está girando normalmente para continuar su marcha en el sentido contrario, con un ritmo similar a la inicial. Sin embargo, en la Fig. 4 el tiempo que alcanza los 10 m, se puede intuir que fue cerca de los 17 s y la persona ha hecho el giro de 180º con algunas complicaciones debido a que no poseía el sentido de la visión. A partir de allí, en el recorrido de regreso a perdido la noción espacial y su caminata ha empeorado notablemente, con detenciones momentáneas para continuar posteriormente.

Para el caso de la orientación de los pies también hubo diferencias, ya que al momento de retornar al punto inicial el individuo sin uso de la visión realizó pasos más cortos en comparación que cuando utilizó la visión. Esto se puede observar la Fig. 6 para el pie izquierdo (SV), después del tiempo de 17 segundos donde el individuo realiza el giro de 180° para retornar al punto inicial presenta zancadas acortadas en comparación cuando el individuo camina con visión (CV), como se muestra en la Fig. 5, después de los 15 segundos, en donde se nota que mantiene zancadas regulares de marcha. Cabe destacar que esto se pudo haber visto afectado debido a que el individuo que realizó la experimentación tiene visión normal, y que conoce el entorno en donde ha realizado la prueba. Sin embargo, se presentaron diferencias notables observadas en las figuras mencionadas.

En las Fig. 5 y Fig. 6 se nota una variación significativa del ángulo *yaw* en ambos resultados. Esto se debe a que la orientación de la marcha sufrió un giro de 180º. Sin embargo, en la Fig. 5 la medición de este ángulo mantiene un periodo y magnitudes similares durante la etapa de regreso. Esto indica que el individuo caminó casi sobre una línea recta. Por otro lado, se nota que la línea recta trazada, está orientada de tal manera que durante la fase de apoyo del pie izquierdo está cerca de los 180 º, por ello lo saltos entre +180º y -180º. Sin embargo, en la Fig. 6, durante la etapa de regreso se nota que los pasos fueron más pequeños y la persona perdía el sentido de la orientación caminando en zigzag y desviándose notablemente hasta alcanzar el punto final.

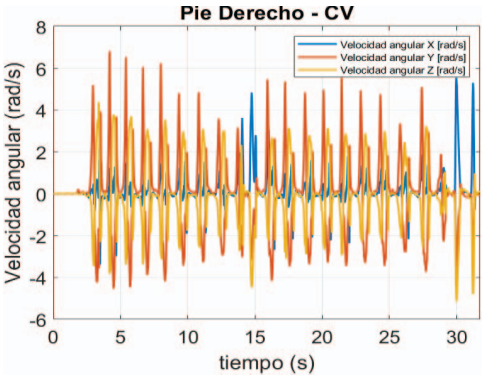


Fig. 3. Velocidad angular del pie derecho en los tres ejes con visión normal.

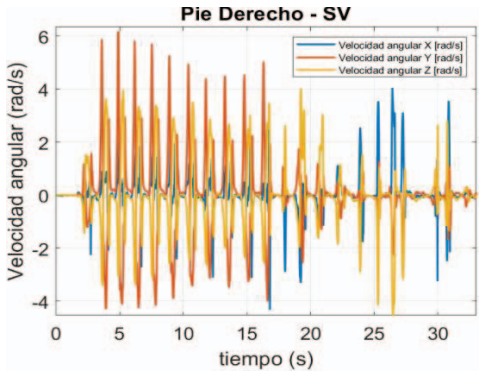


Fig. 4. Velocidad angular del pie derecho en los tres ejes sin el uso de la visión.

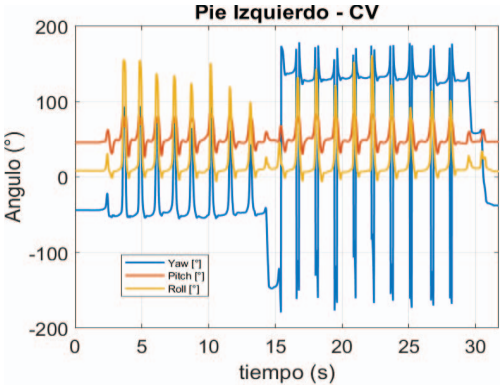


Fig. 5. Ángulos de Euler medidos en el pie izquierdo con visión normal.

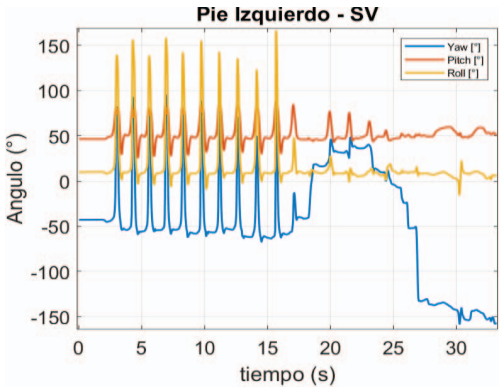


Fig. 6. Ángulos de Euler medidos en el pie izquierdo sin el uso de la visión.

TABLA II. RESULTADOS DE LA PRUEBA T STUDENT DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS.

Parámetro	***valor p***	**¿existe diferencias significativas?**
Ángulo Roll	0.0007	Sí
Ángulo Pitch	0.5003	No
Ángulo Yaw	0.0001	Sí
Velocidad angular X	0.0007	Sí
Velocidad angular Y	0.6068	No
Velocidad angular Z	0.0101	Sí

Aplicando la prueba *t-test* para muestras pareadas para un intervalo de confianza de 95%, los valores de probabilidad (en inglés *p value*) dieron como resultado que 4 de los parámetros medidos, comparando ambas pruebas, arrojaron diferencias estadísticamente significativas, es decir, la marcha en donde el individuo utilizo la visión y no utilizo la visión tuvieron diferencias.

V. Conclusiones

De estudio se puede concluir que la cantidad de personas que participan en los estudios son muy variables, muy pocos estudios realizaron un análisis sobre la cantidad mínima de participantes necesarios para que las muestras de la población sean representativas. Para conocer si la muestra era representativa pudieron haber calculado el coeficiente de variación, muy utilizado en estadística. Realizar marchas con otras actividades físicas diarias como subir escaleras, con pequeñas inclinaciones puede mostrar qué tanta diferencia existe entre personas con alguna afectación en su marcha y personas sanas. Este tipo de modelo experimental no fue encontrado en la literatura, pero que sí será realizado posteriormente en el proyecto que realizan los autores de este artículo.

La consideración de los parámetros biomecánicos en el análisis de la marcha dependerá fundamentalmente sobre el estudio que se esté realizando, como es evidente. En los artículos revisados no se utilizaron todos los parámetros espaciotemporales, cinemáticos o rangos de movimiento, ya que esto depende de los parámetros de interés para analizar la marcha humana, que es dependiente de la enfermedad o tipo de afectación que este impactando a la persona en su marcha, así como si es en personas con discapacidad visual, que es el caso que compete a los autores de este estudio.

Por otro lado, los ensayos preliminares de la marcha comparando la marcha de un individuo utilizando su visión normal (CV) y el mismo individuo con antifaz para interferir en su visión (SV), para simular a una persona con discapacidad visual, presentó diferencias notables, mayoritariamente en la etapa de regreso al punto de partida, después de haber hecho un giro de 180º. Presentó una marcha con zancadas más cortas, velocidades menores, y desorientación en comparación a la marcha CV. Se considera que cuando se evalúen a participantes con discapacidad visual se tendrán datos importantes para poder conocer su forma de caminar, y contribuir a otros estudios para facilitar su desplazamiento en interiores de edificios.

Agradecimiento

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto APY-NI-2021-41 y del proyecto RETINA con código FID-2021-131, ambos financiados por la SENACYT. Héctor Montes agradece al Sistema Nacional de Investigación (SNI-SENACYT) por el apoyo que brinda a sus miembros.

Referencias

[1] J. Collin, P. Davidson, M. Kirkko-Jaakkola, and H. Leppäkoski, *Inertial sensors and their applications*. 2018. doi: 10.1007/978-3-319-91734-4_2.

[2] R. M. Méndez and M. R. Huertas, “Uso de sensores inerciales en la medición y evaluación de movimiento humano para aplicaciones en la salud Uso de sensores inerciales en la medición y evaluación de movimiento humano para aplicaciones en la salud,” *Univ. Autónoma del Estado México*, p. 20, 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Rigoberto-Martinez-Mendez-2/publication/263198667_Uso_de_sensores_inerciales_en_la_medicion_y_evaluacion_de_movimiento_humano_para_aplicaciones_en_la_salud/links/5783bfdd08ae37d3af6c0210/Uso-de-sensores-inerciales-en-l

[3] J. Castellanos-Ruíz, L. M. Montealegre-Mesa, B. D.

Martínez-Toro, J. J. Gallo-Serna, and O. Almanza-Fuentes, “Uso de sensores inerciales en fisioterapia: Una aproximación a procesos de evaluación del movimiento humano,” *Univ. y Salud*, vol. 23, no. 1, pp. 55–63, 2020, doi: 10.22267/rus.212301.214.

[4] L. L. Gómez Echeverry, A. M. Jaramillo Henao, M. A. Ruiz Molina, S. M. Velásquez Restrepo, C. A. Páramo Velásquez, and G. J. Silva Bolívar, “Human motion capture and analysis systems: a systematic review,” *Prospectiva*, vol. 16, no. 2, pp. 24–34, 2018, doi: 10.15665/rp.v16i2.1587.

[5] F. Molina and M. Carratalá, “La Marcha Humana Biomecánica, evaluación y patología,” p. 268, 2020.

[6] J. T. Estellés, “Universidad Católica de Valencia Lección inaugural,” *Univ. Católica Val.*, no. October, 2014.

[7] E. Cubo, P. Mir, and Á. Sánchez, *Manual SEN de Nuevas Tecnologías en Trastornos del Movimiento*. 2021.

[8] M. Paulich, M. Schepers, N. Rudigkeit, and G. Bellusci, “Xsens MTw Awinda : Miniature Wireless Inertial-Magnetic Motion Tracker for Highly Accurate 3D Kinematic Applications.” pp. 1–9, 2018. [Online]. Available: https://www.xsens.com/hubfs/3446270/Downloads/Manuals/MTwAwinda_WhitePaper.pdf

[9] Xsens, “MTw Awinda User Manual,” 2018.

[10] C. Caramia *et al.*, “IMU-Based Classification of Parkinson’s Disease from Gait: A Sensitivity Analysis on Sensor Location and Feature Selection,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 22, no. 6. pp. 1765–1774, 2018. doi: 10.1109/JBHI.2018.2865218.

[11] M. Bertoli *et al.*, “Estimation of spatio-temporal parameters of gait from magneto-inertial measurement units: Multicenter validation among Parkinson, mildly cognitively impaired and healthy older adults,” *BioMedical Engineering Online*, vol. 17, no. 1. 2018. doi: 10.1186/s12938-018-0488-2.

[12] P. Ismailidis *et al.*, “Side to side kinematic gait differences within patients and spatiotemporal and kinematic gait differences between patients with severe knee osteoarthritis and controls measured with inertial sensors,” *Gait and Posture*, vol. 84. pp. 24–30, 2021. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.11.015.

[13] P. Ismailidis *et al.*, “Kinematic changes in patients with severe knee osteoarthritis are a result of reduced walking speed rather than disease severity,” *Gait and Posture*, vol. 79. pp. 256–261, 2020. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.008.

[14] V. Rosso, V. Agostini, R. Takeda, S. Tadano, and L. Gastaldi, “Influence of BMI on gait characteristics of young adults: 3D evaluation using inertial sensors,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 19. 2019. doi: 10.3390/s19194221.

[15] E. Gieysztor, M. Kowal, and M. Paprocka-Borowicz, “Gait parameters in healthy preschool and school children assessed using wireless inertial sensor,” *Sensors*, vol. 21, no. 19. 2021. doi: 10.3390/s21196423.

[16] L. G. Motti Ader, B. R. Greene, K. McManus, and B. Caulfield, “Reliability of inertial sensor based spatiotemporal gait parameters for short walking bouts in community dwelling older adults,” *Gait and Posture*, vol. 85. pp. 1–6, 2021. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.01.010.

[17] G. García-villamil, M. Neira-álvarez, E. Huertas-hoyas, A. Ramón-jiménez, and C. Rodríguez-sánchez, “A pilot study to validate a wearable inertial sensor for gait assessment in older adults with falls,” *Sensors*, vol. 21, no. 13. 2021. doi: 10.3390/s21134334.

[18] S. Qiu *et al.*, “Towards wearable-inertial-sensor-based gait posture evaluation for subjects with unbalanced gaits,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 4. 2020. doi: 10.3390/s20041193.

[19] A. Tanigawa, S. Morino, T. Aoyama, and M. Takahashi, “Gait analysis of pregnant patients with lumbopelvic pain using inertial sensor,” *Gait Posture*, vol. 65, no. May, pp. 176–181, 2018, doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.07.165.

[20] C. Raccagni *et al.*, “Sensor-based gait analysis in atypical parkinsonian disorders,” *Brain Behav.*, vol. 8, no. 6, p. e00977, Jun. 2018, doi: 10.1002/BRB3.977.

[21] R. J. Boekesteijn, J. M. H. Smolders, V. J. J. F. Busch, A. C. H. Geurts, and K. Smulders, “Independent and sensitive gait parameters for objective evaluation in knee and hip osteoarthritis using wearable sensors,” *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 22, no. 1. 2021. doi: 10.1186/s12891-021-04074-2.

[22] J. Soulard, J. Vaillant, R. Balaguier, and N. Vuillerme, “Spatio-temporal gait parameters obtained from foot-worn inertial sensors are reliable in healthy adults in single- and dual-task conditions,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1. 2021. doi: 10.1038/s41598-021-88794-4.

[23] N. Lefeber, M. Degelaen, C. Truyers, I. Safin, and D. Beckwee, “Validity and Reproducibility of Inertial Physilog Sensors for Spatiotemporal Gait Analysis in Patients With Stroke,” *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 27, no. 9. pp. 1865–1874, 2019. doi: 10.1109/TNSRE.2019.2930751.

[24] P. P. Panciani, K. Migliorati, A. Muratori, M. Gelmini, A. Padovani, and M. Fontanella, “Computerized gait analysis with inertial sensor in the management of idiopathic normal pressure hydrocephalus,” *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 54, no. 5. pp. 724–729,

2018. doi: 10.23736/S1973-9087.18.04949-3.

[25] S. Voss *et al.*, "Normative database of spatiotemporal gait parameters using inertial sensors in typically developing children and young adults," *Gait and Posture*, vol. 80. pp. 206–213, 2020. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.010.

[26] I. Mulas, V. Putzu, G. Asoni, D. Viale, I. Mameli, and M. Pau, "Clinical assessment of gait and functional mobility in Italian healthy and cognitively impaired older persons using wearable inertial sensors," *Aging Clinical and Experimental Research*, vol. 33, no. 7. pp. 1853–1864, 2021. doi: 10.1007/s40520-020-01715-9.

[27] R. Romijnders, E. Warmerdam, C. Hansen, J. Welzel, G. Schmidt, and W. Maetzler, "Validation of IMU-based gait event detection during curved walking and turning in older adults and Parkinson's Disease patients," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, no. 1. 2021. doi: 10.1186/s12984-021-00828-0.

[28] C. N. Gerber, L. Carcreff, A. Paraschiv-Ionescu, S. Armand, and C. J. Newman, "Reliability of single-day walking performance and physical activity measures using inertial sensors in children with cerebral palsy," *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 64, no. 3. 2021. doi: 10.1016/j.rehab.2019.02.003.

[29] A. Gera *et al.*, "Gait asymmetry in glucocerebrosidase mutation carriers with Parkinson's disease," *PLoS ONE*, vol. 15, no. 1. 2020. doi: 10.1371/journal.pone.0226494.

[30] T. A. Rodríguez *et al.*, "Assessment of Gait Using Inertial Measurements Units," no. November, 2019.

[31] J. Arellano-González, J. C., Medellín-Castillo, H. I., & Jesús Cervantes-Sánchez, "'Identificación y análisis de los parámetros biomecánicos utilizados para la evaluación de la marcha humana normal y patológica,'" *XXV Congr. Int. Anu. la Somim, México*, p. 9, 2019, [Online]. Available: http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A3_26.pdf

[32] C. Alemán-Ramírez, "Gait of individual with visual impairment: Literature review," *MHSalud*, vol. 17, no. 1, pp. 1–14, 2019, doi: 10.15359/mhs.17-1.5.

[33] E. S. da Silva *et al.*, "Gait and functionality of individuals with visual impairment who participate in sports," *Gait Posture*, vol. 62, pp. 355–358, May 2018, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2018.03.049.

[34] M. A. Timmis, A. C. Scarfe, D. R. Tabrett, and S. Pardhan, "Kinematic analysis of step ascent among patients with central visual field loss," *Gait Posture*, vol. 39, no. 1, pp. 252–257, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2013.07.115.

Thermal-structural analysis of polymers for the manufacture of cases for outdoor pollutants monitoring devices

Análisis térmico-estructural de polímeros para la fabricación de carcasas para dispositivos de monitoreo de contaminantes en exteriores

Sallelis Calderón
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
sallelis.calderon@utp.ac.pa

Miriam Centella
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
miriam.centella@utp.ac.pa

Luis Lozano
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnológico de Monterrey
marcelo.lozano@tec.mx

Alan Sustaita
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnológico de Monterrey
alan.sustaita@tec.mx

Edwin Collado
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
edwin.collado@utp.ac.pa

Yessica Sáez
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
yessica.saez@utp.ac.pa

***Abstract*— Polylactic acid (PLA) has been considered as a base material for the manufacture of cases used in the protection of electronic devices due to its easy handling and low cost; however, it does not have suitable properties for outdoor applications. Based on the above, this work presents the analysis of alternative materials to PLA such as ultra-high density polyethylene (UHDPE), polypropylene (PP) and polymethylmethacrylate (PMMA). Samples are necessary for their analysis, therefore the procedure for the manufacture of plates by compression molding is presented. Thermal characterization, chemical analysis and mechanical stress tests will be applied to the samples. As a result, properties such as hygroscopicity, degradation onset temperature and ductility will be known, which will be evaluated to determine a suitable polymeric matrix for the application.**

Keywords — cases, photodegradation, hygroscopicity, nanoparticle, polymeric matrix, polymers properties

***Resumen —* El ácido poliláctico (PLA) se ha considerado como material base para la fabricación de carcasas utilizadas en la protección de dispositivos electrónicos por su fácil manejo y bajo costo, sin embargo, no posee propiedades adecuadas para aplicaciones en el exterior. Con base en lo anterior, en este trabajo se presenta el análisis de materiales alternativos al PLA tales como el polietileno de ultra alta densidad (UHDPE), polipropileno (PP) y polimetilmetacrilato (PMMA). Para su análisis son necesarias muestras, por tanto, se presenta el procedimiento para la fabricación de placas mediante moldeo por compresión, a las mismas se le aplicarán caracterizaciones térmicas, análisis químicos y pruebas mecánicas de tensión. Como resultado se conocerán propiedades como por ejemplo higroscopicidad, temperatura de inicio de degradación y ductilidad, las cuales se evaluarán para determinar una matriz polimérica adecuada para la aplicación.**

Palabras claves — carcasas, fotodegradación, higroscopicidad, matriz polimérica, nanopartícula, propiedades de los polímeros

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es uno de los principales factores que ha afectado la salud de los seres vivos alrededor del mundo. Esta puede darse por la contaminación del ambiente interior o exterior por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características naturales de la atmósfera. Hoy en día, cerca de 2.6 billones de personas son expuestas a ambientes con niveles de contaminación perjudiciales, lo cual causa aproximadamente 7 millones de muertes anualmente debido a enfermedades respiratorias o cardiovasculares que pueden verse afectadas por la contaminación ambiental [1].

En Panamá, según el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), una de las mayores fuentes de contaminación atmosférica es el flujo vehicular, el cual ha ido en aumento durante los últimos años[2]. En este estudio se puede observar que el monóxido de carbono (CO) es el contaminante más predominante en la atmósfera y a su vez el más peligroso porque no se puede percibir. Además, el estudio presentado en [3] analiza la relación de los niveles de agentes contaminantes como partículas suspendidas PM_{10}, dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3) en el aumento de la mortalidad por problemas cardiovasculares, respiratorios y por diabetes. Los autores concluyen que el país tiene una gran necesidad de implementar mecanismos que permitan a la población conocer los niveles de contaminantes atmosféricos. En [4], los autores estudian la contaminación producida por el vertedero Cerro Patacón en la Ciudad de Panamá y su efecto en el ambiente y la salud de la población en comunidades cercanas. Este trabajo tiene como objetivo adicional sensibilizar a la población sobre el consumo descontrolado y la generación no deliberada de residuos sólidos que se convierten en materia para la contaminación ambiental. En sus resultados se puede resaltar que cerca del 45% de la generación de metano a

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00116

nivel nacional para el 2022 proviene de este vertedero. Además, se estima que los residuos sólidos generados por los habitantes de la ciudad de Panamá impactan en la salud de aproximadamente 73,600 habitantes de las comunidades cercanas debido a la dispersión de contaminantes atmosféricos peligrosos.

Debido a esta problemática se han promovido en el país mecanismos para reducir los niveles de contaminación de aire mediante la creación de leyes y regulaciones que permitan controlar la emisión de estos contaminantes y proteger la salud de la población. Sin embargo, la falta de herramientas que supervisen estos mecanismos muchas veces resulta en soluciones ineficientes para el control de contaminación. Por ello, se ha impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas que permitan brindar estas herramientas a las instituciones correspondientes y la población en general. Por ejemplo, en [5] se presenta un dispositivo de bajo costo con tecnología Arduino y una aplicación móvil para Android para monitorear CO, CO_2, humedad y temperatura. Dentro de la investigación además se busca determinar puntos adecuados de monitoreo para una pequeña ciudad. Los autores en [6] proponen el diseño y desarrollo de un sistema de evaluación de la contaminación del aire en la ciudad de David, Panamá, utilizando la tecnología Arduino. En [7] se presenta el prototipo de un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) para el monitoreo de variables de contaminación de aire y meteorológicas en Panamá. El sistema consta de múltiples estaciones distribuidas en las provincias del país, las cuales envían los datos a través de Internet a una plataforma de análisis y visualización de datos. Este prototipo forma parte del proyecto ITE18-R2-011: "Red de monitoreo basada en Internet de las Cosas (IoT) para la generación de indicadores de contaminación de aire en Panamá", desarrollado por la Universidad Tecnológica de Panamá y financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). Este es el primer esfuerzo en crear una red nacional para el monitoreo ambiental en Panamá que permite a las entidades públicas, privadas, academia y público en general tener acceso en tiempo real a información sobre la contaminación del país.

Estos sistemas de monitoreo de contaminación en su mayoría realizan sus funciones en el exterior de edificios, por lo que requieren de mecanismos de protección contra agentes ambientales tales como lluvia, radiación solar, insectos, impurezas sólidas y todo lo que pueda disminuir su vida útil. Panamá es un país que cuenta con un clima tropical muy húmedo, por lo que es necesario contar con mecanismos de protección dentro del proyecto ITE18-R2-011 para proteger el sistema y garantizar su correcto funcionamiento. Los investigadores inicialmente consideraron el desarrollo de carcasas de protección fabricadas con ácido poliláctico (PLA) por su fácil manejo y bajo costo. Sin embargo, resultados preliminares muestran valores elevados de humedad relativa dentro de las carcasas, superando los valores permitidos de operación de los componentes electrónicos que puede ocasionar un rápido deterioro, corto circuito y/o corrosión en partes metálicas [8]. Por otra parte, las mediciones de temperatura muestran valores que se encuentran dentro del rango de operación de los componentes electrónicos, sin embargo, es un factor que no se debe omitir. Otra variable importante por considerar es la resistencia a la fotodegradación, ya que la carcasa estará expuesta a radiación UV proveniente del sol siendo ésta su principal responsable [3].

En este artículo se presenta un estudio térmico-estructural y una evaluación de propiedades de tres polímeros: Polietileno de ultra alta densidad (UHDPE), Polipropileno (PP) y Polimetil metacrilato (PMMA), como materiales alternativos al PLA para la fabricación de carcasas de protección. La elección de estos polímeros a evaluar en el estudio ha sido debido a características que los mismos poseen. Por ejemplo, el UHDPE posee fuertes fuerzas intermoleculares y resistencia a la tracción por su baja ramificación, lo cual permite que tenga una alta estabilidad química. Además, este polímero tiene una reactividad baja debido a su baja polaridad, lo cual significa que no es atacado por ácidos o bases fuertes [10]. El PP presenta características similares al UHDPE, sin embargo, al tener un carbón terciario lo hace menos estable. Durante los últimos años, el PMMA ha tenido un auge en diversas aplicaciones, una de ellas es el uso de este material en exteriores.

El estudio consiste en el análisis de propiedades térmicas, químicas y mecánicas mediante la realización de caracterizaciones tales como:

- Análisis Termogravimétrico (TGA)
- Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)
- Ensayos de Tensión Uniaxial.

II. Materiales y Métodos/Metodología

El trabajo está enfocado en una investigación experimental donde se realiza un análisis térmico-estructural para evaluar las propiedades de los polímeros UHDPE, PP y PMMA como alternativa al PLA considerado previamente en nuestra investigación.

Los materiales y equipos utilizados para el desarrollo de este experimento son:

- Moldes de acero inoxidable
- Prensas hidráulicas *CARVER* de calentamiento y enfriamiento para proceso de moldeo por compresión
- Espectrómetro infrarrojo *Perkin Elmer*
- Analizador termogravimétrico *Perkin Elmer*
- Equipo para ensayos de tensión uniaxial *INSTRON*

La Fig. 1 detalla las actividades realizadas durante el desarrollo experimental.

A. Fabricación de placas mediante moldeo por compresión

El moldeo por compresión consiste en un proceso de conformación en el que se coloca un polímero y se calienta directamente en un molde metálico en donde se ablanda y luego es obligado a conformase según la forma del molde gracias a la presión ejercida por la prensa hidráulica [11]. Para este experimento se utilizaron polímeros en forma de pellets.

Para la caracterización de los polímeros en estudio es necesario la fabricación previa de placas cuadradas de dimensiones 15x15x0.2 cm. Para este procedimiento se utilizaron prensas hidráulicas (calentamiento y

enfriamiento) marca *CARVER* disponibles en el Laboratorio de Manufactura del Tecnológico de Monterrey, las cuales se observan en la Fig. 1.

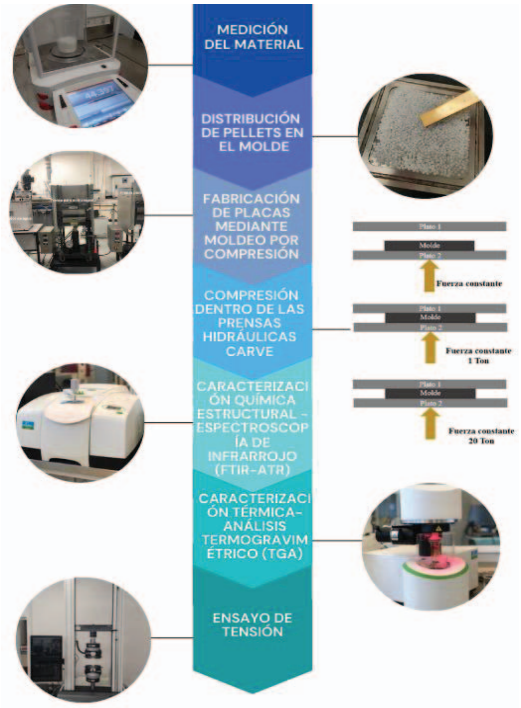


Fig. 1. Actividades realizadas durante el experimento

El proceso de fabricación de placas contempla los siguientes pasos:

1) Precalentamiento del molde

Después de limpiar los moldes, estos se llevan a la prensa de calentamiento que ha sido previamente fijada a una temperatura la cual se determinó tomando como referencia inicial la temperatura de fusión (T_m) encontradas en bibliografía para cada uno de los polímeros considerados. Sin embargo, la temperatura de trabajo fue determinada con precisión mediante experimentación hasta lograr fundir la totalidad del material y lograr un buen acabado en la placa. Esta experimentación inició aumentando 20°C a la temperatura encontrada en bibliografía para garantizar que el polímero esté completamente fundido durante el proceso de compresión. La Tabla 1 que se muestra a continuación presenta las temperaturas utilizadas para cada uno de los materiales.

TABLA 1. TEMPERATURAS DE TRABAJO DE LOS POLÍMEROS PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

Polímero	***Temperatura (°C)***
UHDPE	180
PP	185
PMMA	160
PLA	165

2) Medición del material

La cantidad de material utilizada se determinó a partir de la relación que existe entre la densidad del polímero y del volumen de la cavidad del molde (45 cm^3).

En la siguiente tabla se presenta la cantidad de material utilizado para cada polímero.

TABLA 2. DENSIDAD Y MASA UTILIZADA DE CADA POLÍMERO

Polímero	***Densidad (g/cm^3)***	***Masa (g)***
UHDPE	0.9 – 1.0	42.3 – 43.6
PP	0.9	40.5
PMMA	1.2	53.1
PLA	1.2 – 1.3	56.3 – 57.1

3) Distribución de pellets en el molde

En el molde ya precalentado se distribuyen los pellets uniformemente (Fig. 1) utilizando una espátula de bronce para evitar generar rayaduras en el molde y que estas no afecten la rugosidad y el acabado superficial de la placa.

Una vez distribuidos los pellets, se utiliza una película de acetato o papel aluminio que facilita la total fusión y la fluidez del material dentro del molde. Este paso es un factor importante en la fabricación de las placas, ya que la distribución de los pellets y el material utilizado como medio determinan el acabado final de la placa, y por ende su utilidad. Es importante resaltar que para el PMMA el medio utilizado fue el papel aluminio, ya que éste no se adhiere al polímero.

4) Compresión dentro de las prensas hidráulicas CARVER

El molde debe ser llevado a la prensa de calentamiento procurando que este sea colocado en el centro de las platinas para no causar daños en las prensas. Al estar el molde colocado en la prensa, se le aplica una presión de 1 tonelada durante un tiempo determinado para cada material, esto para asegurar que los pellets se fundieran dentro del molde. Luego, se le aplica una carga de 20 toneladas y finaliza la compresión (Ver Fig. 1).

Se utilizan las mismas consideraciones para llevar el molde a la prensa de enfriamiento. Primero, se le aplica una carga constante de 20 toneladas por el mismo tiempo utilizado en la prensa de calentamiento, o bien, hasta que se tenga una temperatura alrededor de 25 °C y no haya cambios significativos de temperatura. Ya enfriados los moldes, se retiran de la prensa de enfriamiento y se obtiene la placa. A continuación, en la Tabla 3 se presentan los tiempos utilizados a 1 tonelada y 20 toneladas de fuerza aplicada durante el calentamiento, así como el tiempo de enfriamiento.

TABLA 3. TIEMPOS DE COMPRESIÓN

Polímero	*Tiempo @1Ton (min)*	*Tiempo @20Ton (min)*	*Enfriamiento (min)*
UHDPE	3	2	5
PP	5	2	7
PMMA	3	2	5
PLA	5	2	7

B. Caracterización química estructural - Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR-ATR)

La Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), en modo de reflectancia total atenuada (ATR) es ampliamente utilizada para la cuantificación de grupos funcionales de una muestra. Mediante esta caracterización, se puede evaluar parámetros como la susceptibilidad a la degradación de un material [12], ya que se pueden identificar los grupos funcionales, así como determinar qué tan puro es o si ha sido modificado.

La técnica ATR permite el análisis de muestras con una preparación simple siendo ésta una de sus principales ventajas. Su funcionamiento consiste en que una luz infrarroja incide sobre un cristal con un alto índice de refracción generando una onda que proyecta en la muestra, parte de la onda es absorbida por la muestra y el resto es reflejada [12]. El contacto de la luz infrarroja con la muestra provoca vibraciones en los enlaces químicos presentes en las moléculas, detectando la transmisión de energía [13]. Las frecuencias de vibración de los enlaces químicos presentes en el material, así como la intensidad de estas vibraciones, son registrados en un gráfico para su posterior análisis. Para el desarrollo de esta caracterización se utilizó un espectrómetro marca Perkin Elmer, el cual se muestra en la Fig.1.

Las muestras utilizadas fueron las placas fabricadas anteriormente. Éstas se colocaron sobre el cristal de diamante que posee el equipo en donde se le hace presión con una punta metálica, lo que brinda una mejor resolución de la prueba al momento en el que la luz infrarroja se refleja en la muestra.

Para esta caracterización las consideraciones fueron las siguientes:

- Indicador de fuerza para UHDPE: 20 unidades
- Indicador de fuerza para PP, PMMA y PLA: 50-55 unidades

C. Caracterización térmica- Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico es una técnica que consiste en controlar la pérdida de masa de la muestra elevando la temperatura a niveles altos en una atmósfera oxidativa [14]. Para este análisis se utilizó un dispositivo TGA como el que se muestra en la Fig. 1, el cual consiste en un horno que posee una bandeja suspendida en una microbalanza para soportar la muestra del polímero en estudio, siendo esta bandeja un material resistente al calor. Antes de que se inicie el análisis, la bandeja debe estar en posición de equilibrio. Cualquier alteración de la masa conducirá a una alteración del equilibrio. Estos cambios de masa son registrados y representados gráficamente en un termograma [15].

Para la aplicación de esta técnica de caracterización se utilizaron las siguientes consideraciones en los cuatro polímeros en estudio:

- Velocidad de calentamiento: 15°C/min
- Temperatura inicial: 30°C

D. Ensayo de Tensión

Los ensayos de tensión uniaxial son aquellos mediante los cuales se miden las propiedades mecánicas (módulo de Young, alargamiento, límite elástico o carga a la rotura, principalmente) que ofrece un material cuando está sometido a dos fuerzas opuestas, controlando tanto la fuerza aplicada, como la velocidad de estiramiento [10].

En esta caracterización, se utilizaron las placas previamente fabricadas, en donde se hizo el uso del corte por chorro de agua para obtener cinco (5) probetas de cada material. Se optó por este corte debido a que es una técnica que no modifica las propiedades del material. Este ensayo de tensión fue aplicado a probetas normalizadas, las cuales fueron sometidas a un esfuerzo uniaxial hasta producir la rotura de esta. Las pruebas se realizaron a 5 probetas de cada material como lo indica la norma ASTM D638.

Las condiciones a las que se realizaron las pruebas fueron las siguientes:

- Velocidad de deformación: 5mm/min (UHDPE y PP)
  1 mm/min (PMMA y PLA)
- Norma ASTM D368

III. RESULTADOS

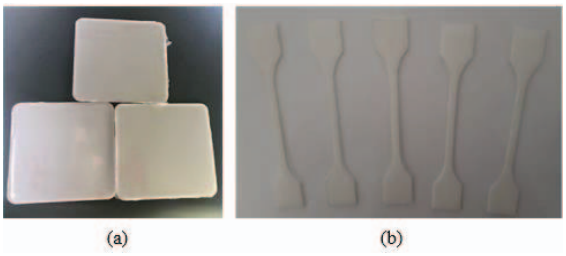
A. Fabricación de placas mediante moldeo por compresión

El resultado del procedimiento anteriormente descrito son placas cuadradas de 15x15 cm con 2 mm de grosor que serán utilizadas para la obtención de probetas, y posteriormente sometidas a pruebas térmicas y de degradación.

De igual forma, a partir de las placas fabricadas se obtuvieron probetas para ser utilizadas en las pruebas de tensión. El corte de éstas se realizó mediante trabajo en frío empleando una cortadora de chorro de agua (Water Jet), ya que esta técnica asegura no alterar el material como por ejemplo cambiar sus propiedades o generar esfuerzos residuales.

1) UHDPE

Las placas de este material se muestran en la Fig. 2(a), las cuales presentaron características particulares, como por ejemplo fácil fabricación con respecto a los otros materiales, además de ser maleables a simple vista. Una vez fabricadas las placas, se llevó a cabo el corte de probetas que observamos en la Fig. 2(b)



(a) (b)

Fig. 2. Placas (a) y probetas (b) de UHDPE

2) PP

Muy similar al UHDPE, este material es de fácil fabricación, sin embargo, adquiere con facilidad marcas provocadas por el medio utilizado (aluminio o acetato). En nuestro caso, fue utilizado un PP con un índice de fluidez (MFI) de 12 g/10 min. Este índice corresponde a la facilidad de desplazarse estando reblandecido [11]. En la Fig. 3(a) se muestra una placa de PP, la cual mostró un comportamiento maleable a simple vista. En la Fig. 3(b) se presentan las probetas obtenidas.

(a) (b)

Fig. 3. Placa (a) y probetas (b) de PP

3) PMMA

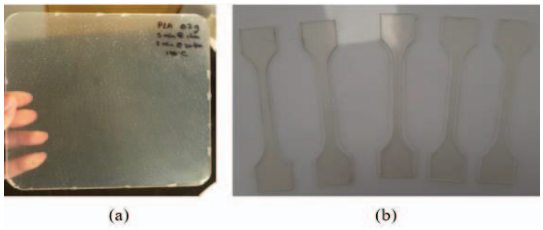
Las placas de este material presentaron características diferentes a los dos anteriores. Por ejemplo, son transparentes y frágiles, como se puede observar en la Fig. 4 (a). Al igual que las demás placas, observamos las probetas de este polímero en la Fig. 4(b).

(a) (b)

Fig 4. Placas (a) y probetas (b) de PMMA.

4) PLA

Para este material se obtuvieron placas translúcidas y frágiles similares al PMMA. Sin embargo, se puede observar en la Fig. 5(a) que las placas presentan manchas que podrían ser producto de humedad en el material o de alguna impureza presente en el PLA en uso. Además, observamos en la Fig. 5(b) las cinco probetas recortadas para realizarle las pruebas mecánicas



(a) (b)

Fig. 5. Placas (a) y probetas (b) de PLA.

B. Caracterizaciones

1) Caracterización térmica- Análisis Termogravimétrico (TGA)

En las Fig. 6 y Fig. 7 podemos observar el comportamiento térmico de dichos polímeros, en donde obtuvimos datos relevantes como la temperatura de inicio de degradación, temperatura de máxima velocidad de descomposición y etapas de descomposición, las cuales pueden atribuirse a la presencia de otro compuesto como en el caso del PLA, o bien, a la presencia de cadenas de diferente tamaño, como se observa en el termograma del UHDPE.

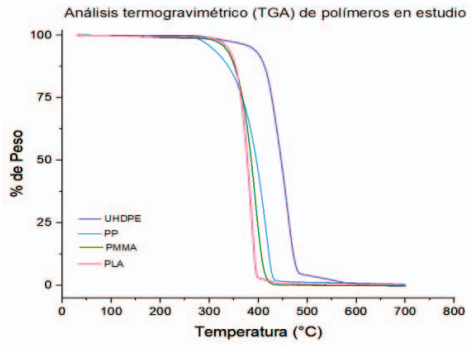


Fig. 6. Comparación de termogramas de los polímeros en estudio

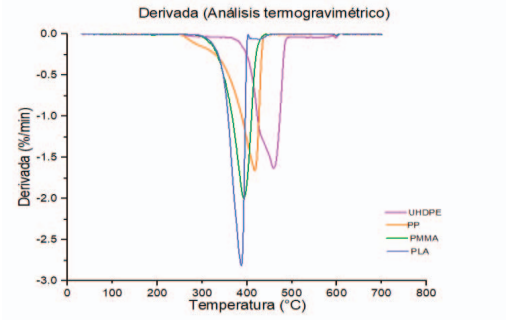


Fig. 7. Derivadas de los termogramas de los polímeros en estudio

2) Caracterización químico estructural- Espectroscopía de Infrorrojo (FTIR-ATR)

Esta caracterización brinda información sobre la presencia de grupos químicos funcionales que poseen los polímeros, y a su vez muestra la higroscopicidad del material para su posterior análisis.

En las Fig. 8 y Fig. 9 se presentan los resultados correspondientes al UHDPE y PP. Para estos dos materiales se garantiza que se están utilizando materiales puros, ya que

los espectros muestran la presencia únicamente de los enlaces formados por carbono e hidrógeno (C-C, y C-H)
.

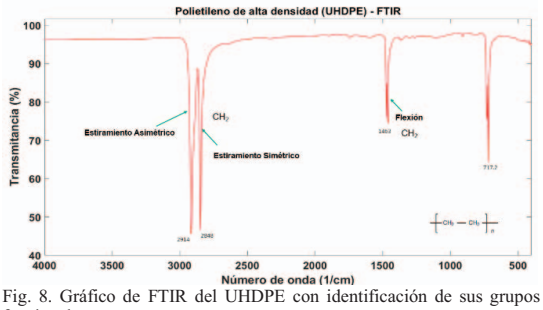


Fig. 8. Gráfico de FTIR del UHDPE con identificación de sus grupos funcionales

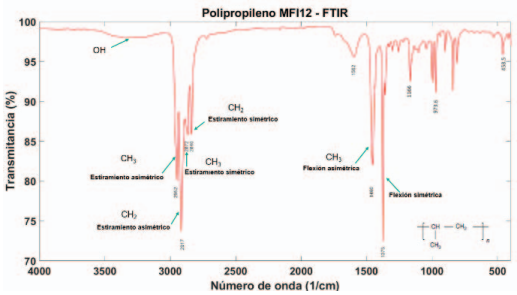


Fig. 9. Gráfico de FTIR del PP con identificación de sus grupos funcionales

Las estructuras químicas del PMMA (Fig. 10) y PLA (Fig. 11) son más complejas debido a la presencia de oxígeno, lo cual genera otros grupos funcionales como por ejemplo C=O, o C-O-C.

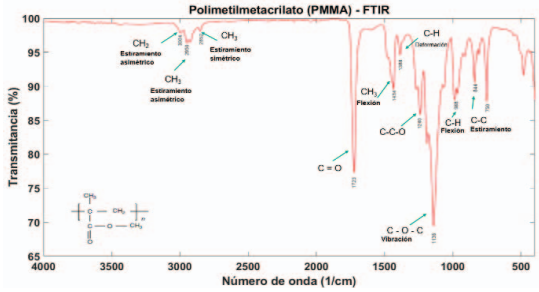


Fig. 10. Gráfico de FTIR del PMMA con identificación de sus grupos funcionales

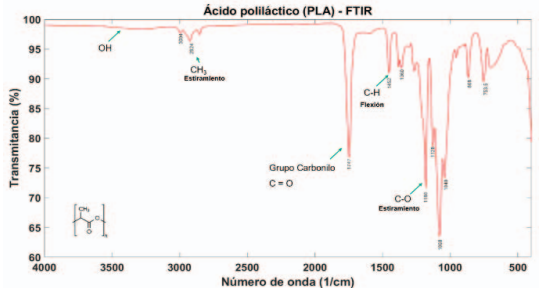


Fig. 11. Gráfico de FTIR del PLA con identificación de sus grupos funcionales

Polímeros como el PP y el PLA muestran una señal detectable en el rango entre 3000 y 3500 cm^{-1}, asociado a la presencia del grupo funcional O-H debido a la absorción de agua del medio ambiente, lo cual se puede relacionar con la higroscopicidad de estos polímeros.

3) Ensayo de tensión

Con base a las condiciones utilizadas, podemos apreciar en la Fig. 12 el comportamiento de los polímeros mediante la gráfica de *Esfuerzo vs Deformación*. Con esta prueba se obtuvieron diferentes propiedades mecánicas de los polímeros en estudio que detallamos en la tabla 4 para luego realizar un análisis comparativo y fundamentar la selección del material alternativo al PLA.

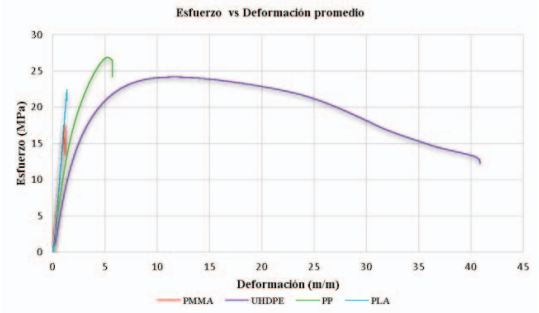


Fig. 12. Diagrama Esfuerzo vs Deformación promedio de los polímeros en estudio

TABLA 4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS POLÍMEROS EN ESTUDIO

Polímero	*Módulo de Young (MPa)*	*Elongación (mm/mm)*	*Esfuerzo último (MPa)*
UHDPE	777.3720	0.4588	24.1720
PP	1101.5300	0.0302	27.6650
PMMA	1679.8040	0.0123	17.5000
PLA	1856.1660	0.0040	22.3200

IV. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La carcasa propuesta para monitoreo ambiental estará expuesta a agentes ambientales en el exterior, por lo que es evidente que existen propiedades las cuales deben ser consideradas para la selección de la matriz polimérica, como es el caso de la higroscopicidad. Al tener un material con una mayor higroscopicidad se afecta el sistema electrónico provocando deterioro en las placas con la posibilidad de ocasionar corto circuito y facilitando así el proceso corrosivo de los componentes.

A su vez, la fotodegradación que es ocasionada por la radiación ultravioleta y que es responsable de daños en la superficie del polímero, causando el deterioro del material en largas exposiciones siendo las poliolefinas como PP y PE en sus variantes las más susceptibles [9].

Por otra parte, la degradación térmica es responsable de daños a nivel químico y físico de los polímeros cuando estos experimentan altas temperaturas en repetidas ocasiones, o bien cuando se supera su punto de transición vítrea [16]. Dicho lo anterior, el dato correspondiente a la Tg el cual obtenemos del análisis TGA se debe tener en consideración para la fabricación de la carcasa

independientemente de la técnica seleccionada. Esto debido a que si es superada esta temperatura el material adquiere cambios irreversibles.

Una vez desarrolladas las caracterizaciones, se puede hacer un análisis para determinar cuál polímero de los estudiados cumple con las características esperadas. Según los resultados obtenidos, se puede observar que el UHDPE resultó ser el menos higroscópico, mientras que el PP y el PLA son más propensos a la absorción de humedad. Los resultados obtenidos en TGA con respecto a la temperatura de inicio de degradación indican que el UHDPE presenta una mayor temperatura de inicio de degradación que el resto de los polímeros en estudio, siendo el PP el que cuenta con la menor temperatura.

La otra propiedad bajo análisis es la ductilidad que, según los resultados de los ensayos de tensión, ayuda a clasificar los materiales, siendo los dos más dúctiles el UHDPE y el PP, mientras que los dos más frágiles fueron el PLA y el PMMA. La ductilidad de un polímero es una de las propiedades que más influencia tiene al momento de fundamentar nuestra elección la cual observamos con la deformación alcanzada hasta la ruptura. Un polímero que muestre una fractura dúctil en una prueba de tensión uniaxial podría emplearse para fabricar productos con geometrías más complejas sin romperse, en comparación con un polímero frágil

La siguiente imagen muestra un diagrama comparativo de los polímeros en estudio con respecto a las propiedades analizadas.

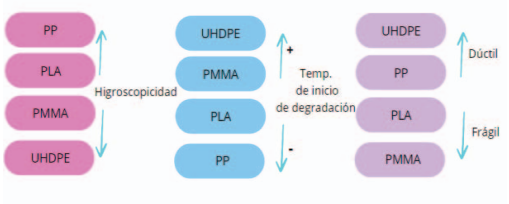


Fig. 13. Diagrama comparativo de polímeros en estudio con respecto a las propiedades analizadas

Según los resultados presentados, se puede mencionar que el UHDPE es el polímero más adecuado para la aplicación de monitoreo ambiental en exterior porque tiene un mejor comportamiento de las propiedades estudiadas. Sin embargo, se espera próximamente poder realizar pruebas de degradación acelerada en donde se pueda evaluar el efecto de la exposición a radiación ultravioleta, temperatura y humedad del ambiente y así estimar el tiempo que durarán estos materiales expuestos a la intemperie de forma que se pueda tomar una mejor decisión tomando en consideración más variables. Es importante mencionar que estas propiedades deben ser mejoradas, ya que el hecho de que algunos polímeros sean higroscópicos y/o susceptibles a la fotodegradación, abre la posibilidad de buscar un nanomaterial que mezclado con la matriz polimérica propuesta de lugar a un material compuesto con propiedades optimizadas para la aplicación deseada.

V. Conclusiones

El trabajo presentado tuvo como objetivo realizar un estudio térmico-estructural y una evaluación de propiedades a materiales alternativos al PLA para la fabricación de carcasas en aplicaciones de monitoreo ambiental en el exterior. Específicamente, se consideraron el polietileno de ultra alta densidad (UHDPE), polipropileno (PP) y polimetilmetacrilato (PMMA).

Con base en los métodos utilizados y los resultados obtenidos dentro de esta investigación, concluimos que la técnica de moldeo por compresión utilizada para la obtención de placas es una técnica sencilla que permitió obtener las placas para el corte de probetas y su posterior caracterización.

Para la selección de cualquier material a utilizar, independientemente de la aplicación que se requiera, es necesario realizarle diversas pruebas de caracterización. En este caso mediante FTIR-ATR se pudo obtener las propiedades estructurales de los polímeros en donde se determinó que el PP y el PLA poseen una higroscopicidad mayor que la del PMMA y la del UHDPE. Con respecto a las caracterizaciones térmicas y mecánicas, se puede resaltar dos propiedades que ayudaron a seleccionar el material alternativo al PLA. En cuanto a las características térmicas, los cuatro polímeros en estudio presentan temperaturas de degradación relativamente altas para la aplicación que se requiere, por lo cual las propiedades térmicas son óptimas en los mismos. Por otro lado, con respecto a las propiedades mecánicas, el PP y el UHDPE son los que cuentan con mejores condiciones para nuestra aplicación siendo este último el que mayor elongación presenta. Finalmente, para la fabricación de la carcasa es importante tener presente la ductilidad del material. Con los resultados obtenidos del ensayo de tensión se obtuvo que el UHDPE y el PP son los más dúctiles, lo cual debe considerarse para nuestra selección de polímero, ya que facilitará su procesamiento mediante diferentes técnicas de fabricación.

Como trabajo futuro se realizarán pruebas de degradación acelerada, de esta forma se estimará la duración de cada uno de los polímeros expuestos a condiciones atmosféricas, y así la selección de la matriz polimérica contemplará más variables. Por otra parte, se considerará el estudio y selección de un nanomaterial que haga la matriz polimérica menos higroscópica y le brinde mayor resistencia a la fotodegradación.

VI. Agradecimientos

Los autores agradecen a los miembros del grupo de investigación Ingeniería de Telecomunicaciones y Sistemas Inteligentes Aplicados a la Sociedad (ITSIAS) de la Universidad Tecnológica de Panamá y a los miembros del grupo de investigación LDHO del TEC de Monterrey, México por el apoyo en el desarrollo de las actividades de este proyecto. Los autores también reconocen el apoyo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de Panamá bajo la subvención No. 63-2019-ITE18-R2-011 y el Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá.

Referencias

[1] A. Goshua, C. Akdis, and K. Nadeau, “World Health Organization global air quality guideline recommendations: Executive summary,” *European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, Jan. 2022.

[2] "Índice de intensidad del flujo vehicular y automóviles en circulación por mil habitantes en la República de Panamá (2013-17)".

[3] V. H. Herrera, A. Cumbrera, W. Urriola, H. Quintana, V. Hugo, and H. Ballesteros, "RELATIONSHIP OF THE ENVIRONMENTAL INDEX AND THE OCCURRENCE OF DEATHS FROM CHRONIC RESPIRATORY DISEASE, CARDIOVASCULAR DISEASE AND DIABETES IN ADULTS OVER 65 YEARS OF AGE IN PANAMA CITY, 2003-2014," vol. 24, no. 1, pp. 126–146, 2022.

[4] J. M. Torrente-Velásquez, M. Giampietro, M. Ripa, and R. Chifari, "Landfill reactions to society actions: The case of local and global air pollutants of Cerro Patacón in Panama," *Science of the Total Environment*, vol. 706, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135988.

[5] Lilia Munoz, "Measuring Air Pollution Through Small Sensors for Environmental Monitoring in Small Cities," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V8, no. 05, Jun. 2019, doi: 10.17577/IJERTV8IS050561.

[6] L. Muñoz, J. Delgado, and V. Rodriguez, "Medición de la contaminación del aire con tecnología de bajo costo Measurement of air pollution with low-cost technology."

[7] O. de León, B. Cedeño, E. Collado, Y. Sáez, and F. Canto, "Design of an IoT- Based System for Air Pollutants Monitoring," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2021, vol. 2021-July. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.160.

[8] L. P. Andrade, "Protección de Sistentas Eléctricos contra agentes ambientales," *CIENCIA UNEMI*, vol. 3, no. 4, pp. 56–63, Jul. 2015, doi: 10.29076/issn.2528-7737vol3iss4.2010pp56-63p.

[9] H.-J. Cantow, P. H. J. Harwood, J. P. Kennedy, A. Ledwith, J. Meifiner, and S. Olive, "Polymers Properties and Applications."

[10] "Polietileno (PE) | Tecnología de los Plásticos." https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/polietileno-pe.html (accessed Jul. 16, 2022).

[11] "Moldeo por compresión | Tecnología de los Plásticos." https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-compresion.html (accessed May 25, 2022).

[12] C. Stihi *et al.*, "ATR-FTIR spectrometry characterisation of polymeric materials ATR-FTIRăSPECTROMETRYăCHARACTERISATIONăă OFăPOLYMERICăMATERIALSăă," 2014.

[13] A. B. D. Nandiyanto, R. Oktiani, and R. Ragadhita, "How to read and interpret ftir spectroscope of organic material," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 97–118, 2019, doi: 10.17509/ijost.v4i1.15806.

[14] N. Saadatkhah *et al.*, "Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis—TGA," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 98, no. 1. Wiley-Liss Inc., pp. 34–43, Jan. 01, 2020. doi: 10.1002/cjce.23673.

[15] "Fundamentos del análisis termogravimétrico - Expectrometros." https://espectrometria.com.mx/fundamentos-del-analisis-termogravimetrico/ (accessed May 25, 2022).

[16] K. Pielichowski and J. Njuguna, "Thermal Degradation of Polymeric Materials." [Online]. Available: http://www.rapra.net

Countersink depth control in aeronautical structural components drilling processes by machining forces analysis

Control de altura de avellanado en procesos de taladrado de componentes estructurales aeronáuticos mediante el análisis de fuerzas de mecanizado

Antonio Guerra-Sancho
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Carlos III de Madrid
Madrid, Spain
antguerr@pa.uc3m.es

Juan Fernández Pérez
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Carlos III de Madrid
Madrid, Spain
jfperez@pa.uc3m.es

María Henar Miguélez Garrido
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Carlos III de Madrid
Madrid, Spain
mhmiguel@ing.uc3m.es

José Luis Cantero Guisández
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Carlos III de Madrid
Madrid, Spain
jcantero@ing.uc3m.es

José Díaz Álvarez
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Carlos III de Madrid
Madrid, Spain
jodiaz@ing.uc3m.es

***Abstract*—In the era of digitalization, Industry 4.0 is spreading across the aeronautical sector with the purpose of improving and optimizing its production systems by means of process monitoring with sensors and processing the large amount of generated data. In the aircraft assembly process, mechanical joints play a fundamental role and are critical points from a structural perspective. The countersink is one of the key elements of the joint, especially when located on the outer skin of the aircraft because of aerodynamic reasons. This paper proposes a countersink depth parameter quality control system performing data analysis techniques for industrial automatic drilling processes of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) aircraft structural components. The proposed system intends to determine the countersink depth of the hole in real time and in a non-intrusive way by processing the signals of machining forces, axial force, and torque, recorded during the operation. The followed methodology is based on a series of experimental tests with force monitoring to develop the new system. Finally, the achieved results are validated using a high-performance contact measurement equipment. The validation is successful and shows the great potential of the new method. The industrial implementation of this system would mean an important progress within the process, allowing real-time hole inspection instead of the traditional periodic inspection systems.**

Keywords—data analysis, advance manufacturing, CFRPs machining, aeronautical components, machining forces, control, industry 4.0, digitalization.

***Resumen*—En la era de la digitalización, la industria 4.0 se extiende al sector aeronáutico con el propósito de mejorar y optimizar sus sistemas productivos mediante la monitorización de los procesos instalando sensores y el posterior aprovechamiento de la gran cantidad de datos generada. En el proceso de ensamblaje de las aeronaves las uniones mecánicas desempeñan un papel fundamental y son puntos críticos desde el punto de vista estructural. El avellanado es uno de los elementos clave de la unión, sobre todo, cuando se localiza en la piel exterior del avión por motivos aerodinámicos. En este artículo se plantea un sistema de control de calidad del parámetro altura de avellanado mediante análisis de datos para sistemas industriales de taladrado de componentes aeronáuticos de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). El sistema propuesto trata de determinar la altura de avellanado del agujero en tiempo real y de forma no intrusiva a partir del procesamiento de las señales de fuerzas de mecanizado, fuerza axial y par torsor, registradas durante la operación. La metodología seguida parte de una serie de ensayos experimentales con monitorización de fuerzas para desarrollar el nuevo sistema. Finalmente, los resultados obtenidos se validan con un equipo de medición de contacto de altas prestaciones. La validación resulta satisfactoria y muestra el gran potencial del nuevo método. La implementación de este sistema a nivel industrial supondría un gran avance para el proceso permitiendo la inspección de todos los agujeros en tiempo real a diferencia de los sistemas de control periódico tradicionales.**

Palabras claves—análisis de datos, fabricación avanzada, mecanizado de CFRPs, componentes aeronáuticos, fuerzas de mecanizado, control, industria 4.0, digitalización.

I. INTRODUCCIÓN

En el marco de las técnicas avanzadas de fabricación surge como tendencia actual la digitalización de los sistemas productivos, con la finalidad de optimizar los procesos industriales hasta niveles que anteriormente resultaban inalcanzables. Está digitalización consiste en la monitorización de los procesos productivos mediante la constante recogida de datos durante su ejecución, el procesamiento y análisis del gran volumen de información recopilada, y el consecuente control del proceso. Un tratamiento adecuando de los flujos de información permite la gestión integrada de los sistemas de fabricación y mejoras sustanciales en términos de precisión, eficiencia, flexibilidad, seguridad, mantenimiento predictivo y control de calidad. Esto se conoce como la cuarta revolución industrial o industria 4.0 [1,2].

El sector aeroespacial, que siempre ha sido conocido por sus elevados estándares de calidad y requerimientos de

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00117

precisión, apuesta por la mejora de sus sistemas productivos mediante la implementación de las nuevas tecnologías de la industria 4.0, como la inteligencia artificial, realidad aumentada, Machine Learning, Data Analytics y tecnologías de la información, comunicación y conectividad [3-6]. Este artículo se centra en la aplicación de técnicas de Data Analytics para el control de sistemas industriales de taladrado automático de componentes aeronáuticos estructurales donde el avellanado cobra gran importancia.

En concreto, se trata de componentes de material compuesto reforzado con fibra de carbono (CFRPs) taladrados mediante herramientas de metal duro con recubrimiento de diamante. Estos componentes pertenecen al fuselaje del avión y desempeñan funciones aeroestructurales. Durante las últimas décadas el uso de materiales compuestos en la industria aeronáutica ha aumentado exponencialmente, y con ello el número de operaciones de estas características. Únicamente en el cono de cola del fuselaje, conocido como sección 19, se realizan alrededor de 9000 agujeros, y en su conjunto el 53% del peso estructural de la aeronave es material compuesto, de modo que el volumen de taladros realizados en este tipo de material a lo largo de todo el proceso de fabricación del avión es inmenso.

Se trata de operaciones de mecanizado de gran complejidad debido a la baja maquinabilidad de los materiales y a las elevadas exigencias en cuanto a calidad e integridad superficial. La heterogeneidad del material junto a la dureza y abrasividad de las fibras produce un desgaste de herramienta severo [7]. La complejidad de este tipo de operaciones puede resultar en la aparición de defectos [8,9]. Los defectos más comunes asociados al mecanizado de CFRPs son delaminación, acabado irregular de las superficies de mecanizadas, extracción de fibras y degradación térmica.

Una de las partes críticas del proceso es la operación de avellanado. El avellanado está destinado a alojar la cabeza del remache o tornillo de la unión y se emplea generalmente por motivos aerodinámicos. En las aeronaves de alta velocidad el enrasado del remache con la superficie exterior del fuselaje es un factor determinante para su comportamiento aerodinámico. La altura o profundidad de avellanado resulta un parámetro de vital importancia, ya que un error en el mismo puede afectar a la resistencia de la unión y al comportamiento aerodinámico del componente implicado. Si el valor de la altura de avellanado del agujero no es lo suficientemente preciso, la cabeza del remache puede sobresalir sobre el perfil aerodinámico de la superficie o hundirse dentro de este, lo cual resulta en detrimento de la eficiencia aerodinámica de dicho perfil. En cuanto al desempeño mecánico de la unión, Liu et al. [10] y Qin et al. [11] estudiaron la influencia del error de altura de avellanado en la resistencia máxima a tracción y la vida a fatiga, respectivamente, de una unión de características similares. La naturaleza de este tipo de error es la propia complejidad del proceso, como las características de maquinabilidad de los CFRPs, la geometría de los componentes taladrados, etc. [12-15], junto a pequeñas desviaciones al referenciar la herramienta.

En el presente estudio se plantea un sistema de control de calidad no intrusivo de la altura de avellanado de los agujeros para detectar los errores que se produzcan durante el proceso en tiempo real. Para ello, se ha partido de las señales de las fuerzas de mecanizado instantáneas, fuerza axial y par torsor, registradas en el husillo durante la operación. El sistema de control de calidad empleado en la actualidad es una técnica de inspección óptica que verifica si la dimensión de la altura de avellanado se encuentra dentro de las tolerancias admitidas. Debido a la complejidad de este tipo de técnicas, las inspecciones se realizan periódicamente cada cierto número de agujeros. La ventaja de un nuevo sistema que permita la verificación en tiempo real evitaría la repetición y reproducción de errores, lo que supondría un gran ahorro de tiempo y coste.

En una metodología de monitorización no intrusiva, no se utilizan sensores externos, sino que se analiza la información proporcionada por la máquina, como la corriente eléctrica, la potencia y el consumo de energía [16]. De este modo, la medición no interfiere en el proceso de mecanizado y no requiere ningún elemento externo a la máquina, lo que reduce los costes asociados. Además, se puede obtener en tiempo real de forma rápida y sencilla directamente desde la máquina y resulta en una monitorización de la herramienta eficaz y de bajo coste que se puede integrar fácilmente con un software eficiente para el procesamiento de datos.

Para el desarrollo de este sistema se ha trabajado con los datos obtenidos en ensayos experimentales realizados en la Universidad Carlos III de Madrid. El fin último será la transferencia de este sistema al proceso industrial real. Los sistemas de taladrado industriales actuales se pueden equipar fácilmente para registrar la potencia consumida por el husillo principal durante cada una de las operaciones realizadas. La potencia es función del par instantáneo, por lo que el análisis dispuesto en el presente documento tendría una alta transferencia. Este tipo de señales, a pesar de presentar gran volumen de ruido al tratarse de un entorno industrial, contiene una gran cantidad de información acerca de la operación de mecanizado. El enorme potencial de la señal en cuanto a monitorización y control del proceso podría permitir la optimización de múltiples aspectos de diferente naturaleza [17-19]. El control de altura de avellanado sería uno de los módulos integrables en un sistema de control más amplio que pretende optimizar también otros aspectos: estimación del nivel de desgaste de herramienta, detección de rotura de herramienta, etc. Este sistema de control estaría destinado a su instalación directa en la máquina de taladrado automático encargada de ejecutar las operaciones.

II. METODOLOGÍA DE ENSAYO

El sistema de control de altura de avellanado propuesto tiene el objetivo de determinar la altura de avellanado del agujero mediante el procesamiento de las señales de par torsor y fuerza axial obtenidas durante la operación de mecanizado. La metodología seguida para el desarrollo del sistema se basa en la validación experimental del software de procesamiento planteado. En una primera etapa se mide la altura de avellanado mediante un método de contacto tradicional de gran precisión. En la segunda etapa se implementa el programa de procesamiento de las señales de fuerza para determinar la altura de avellanado únicamente a partir de su tratamiento. Finalmente, se verifica la validez y precisión del sistema de procesado de la señal con respecto a las mediciones obtenidas con el método tradicional.

A. Geometría de la herramienta y especificaciones de la pieza

Las placas en las que se realizaron los ensayos son probetas de material del propio proceso de montaje de los componentes estructurales. Este material está compuesto por

un total de 55 láminas unidireccionales de fibra de carbono preimpregnadas de resina epoxi con un contenido de resina del 34 %. Las láminas se encuentran distribuidas de forma multidireccional con cuatro orientaciones distintas. La parte superior del laminado está recubierta de una lámina de cobre expandido como sistema de protección ante rayos o descargas eléctricas. La parte inferior cuenta con una lámina de tejido de fibra de vidrio de clase E con el propósito de minimizar el daño por delaminación a la salida del agujero durante la operación de mecanizado. La placa resultante tiene un espesor de 9,5mm.

La herramienta empleada es una broca avellanadora de metal duro con recubrimiento de diamante, fabricada por la empresa Ham Präzision para su aplicación específica en los procesos de taladrado de componentes aeronáuticos. El substrato de metal duro se conoce como EMT100 y se trata de un metal duro cementado de microgramo con 0,8 µm de tamaño de grano medio y una composición de 93 % de carburo de volframio, 6 % de cobalto y 1 % de otros materiales. El diámetro de la broca es de 4,825 mm. La geometría de la broca se muestra en la figura 1.

B. Montaje experimental y condiciones de mecanizado

Los ensayos consistieron en la realización de taladros de diámetro 4,8 mm en probetas de material rectangulares planas de dimensiones 210x297 mm (DIN A4 según el estándar ISO 216). Los taladros se realizaron en un centro de mecanizado de control numérico KONDIA modelo B500 preparado con un dinamómetro piezoeléctrico rotativo del fabricante Kistler modelo 9123C para registrar el par torsor y la fuerza axial instantánea a lo largo de la operación. La señal obtenida se acondicionó mediante un amplificador Kistler 5070A para su posterior adquisición con una tarjeta Keithley Kusb 3100 m.

El agarre de la herramienta se llevó a cabo mediante un mandril de expansión hidráulica según la DIN 69871 de diámetro de sujeción de 20 mm. Además, fue necesario el diseño y la implementación de un utillaje a medida con la función de posicionar las probetas de material y permitir la correcta evacuación del polvo producido durante el mecanizado. La configuración final del centro de mecanizado con el utillaje, el dinamómetro, las mangueras de aspiración, la probeta y la herramienta de corte, utilizada para la realización de los ensayos con medición de fuerzas se muestra en la figura 2.

Los ensayos fueron realizados variando los parámetros de corte con el fin de observar su influencia. Durante la ejecución de estos, se asignó una herramienta para cada una de las distintas condiciones de corte. Los parámetros de corte empleados se muestran en la tabla 1. Con cada herramienta se efectuaron más de 660 taladros y se midieron las fuerzas de ciertos taladros intermedios entorno a los 100, 260, 360 y 460 agujeros. De este modo, en el análisis que se presenta se ha contado con muestras de taladros realizados con distinta vida de herramienta y distintos parámetros de corte.

Fig. 1. Geometría de la broca de taladrado-avellanado.

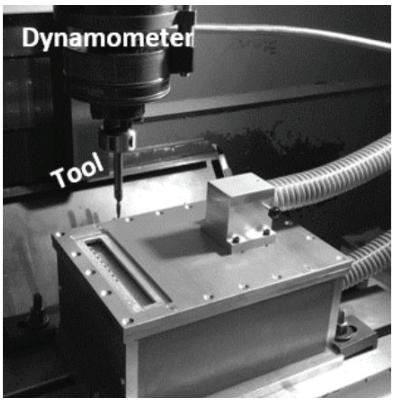


Fig. 2. Configuración experimental para la medición de fuerzas.

En cada ensayo, la operación de mecanizado completa se puede dividir en dos fases o suboperaciones, una primera fase de taladrado y una segunda fase de avellanado. Para que los parámetros de corte se mantengan tanto en la fase del taladrado como en la fase del avellanado, es necesario modificar los parámetros de la máquina en el cambio de operación. Los parámetros de máquina son la rotación en rpm y la velocidad de avance (V_f) en mm/min. Los parámetros de máquina asociados a cada una de las condiciones de corte para que estas sean equivalentes durante el taladrado y el avellanado se muestran en la tabla 2.

C. Equipo de inspección del perfil mecanizado y medición de la altura de avellanado

El equipo empleado para la medición del perfil del agujero y la posterior obtención de la altura de avellanado es un perfilómetro rugosímetro de contacto modelo MarSurf XC20 del fabricante Mahr. El perfilómetro consta de un palpador encargado de recorrer el perfil del agujero haciendo contacto con la superficie. El extremo del palpador cuenta con una punta de diamante de radio 5 µm que se desplaza a una velocidad de 0,5 mm/s sobre la muestra, de tal forma que va oscilando durante el recorrido de palpado, generando una señal analógica que permite la adquisición digital y reconstrucción del perfil. En la figura 3 se muestra una imagen del palpador durante el proceso de medición del perfil de un agujero de la probeta.

TABLA I. PARÁMETROS DE CORTE

Hta	*Velocidad de corte (V_C) [m/min]*	*Avance (f) [mm/rev]*
1	60	0,10
2	50	0,12
3	60	0,12
4	50	0,10

TABLA II. PARÁMETROS DE MÁQUINA

Parámetros máquina	Herramienta			
	1	*2*	*3*	*4*
RPM tal [rpm]	3960	3300	3960	3300
Vf tal [mm/min]	396	396	475	330
RPM av [rpm]	1800	1500	1800	1500
Vf av [mm/min]	180	180	216	150

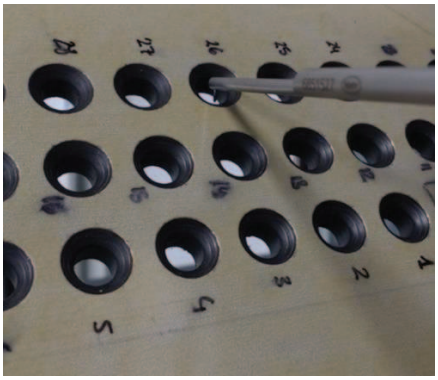


Fig. 3. Medición del perfil avellanado con el perfilómetro de contacto.

El equipo MarSurf XC20 dispone del módulo MarWin contour evaluation software, que permite el tratamiento de los datos del perfil con la finalidad de obtener dimensiones y parámetros característicos. Este módulo ha sido empleado para obtener la altura de avellanado de cada agujero a partir de su perfil. El procedimiento seguido se muestra en las figuras 4 y 5.

D. Procesado de la señal

En esta sección se describe el procedimiento seguido para la determinación de la altura de avellanado a partir de los datos de fuerza y par instantáneos registrados durante los ensayos. Las condiciones y parámetros correspondientes a la fase de toma de datos se presentan a continuación.

La sensibilidad del dinamómetro es de 4,99 mV/N para la fuerza axial Fz y 536,7 mV/Nm para el par torsor Mz. El amplificador fue configurado con una ganancia de 200 para la fuerza axial y de 2200 para el par torsor, de tal forma que la señal resultara relevante.

Para determinar la frecuencia de adquisición se llevó a cabo un estudio de las frecuencias características de la operación, teniendo en cuenta los parámetros de corte y el material.

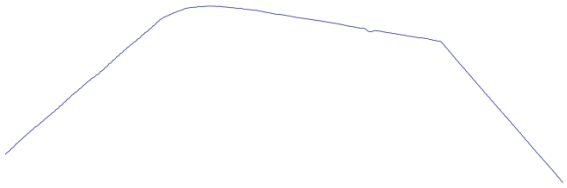


Fig. 4. Perfil bruto del avellanado medido con el perfilómetro de contacto.

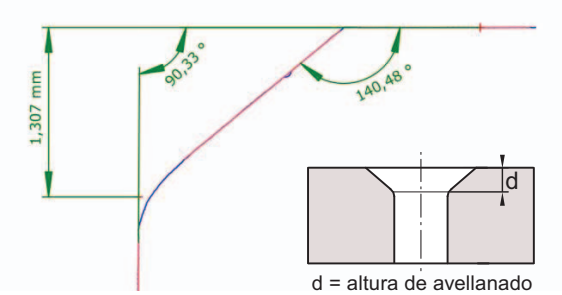


Fig. 5. Obtención del parámetro altura de avellanado a partir del perfil medido con el perfilómetro de contacto. Taladro 366 de la herramienta 1.

En base a los resultados del estudio, para evitar el fenómeno de aliasing, se utilizó una frecuencia de adquisición de 1000 Hz, que se sitúa un orden de magnitud por encima de la frecuencia de Nyquist.

De manera adicional a la señal de fuerzas que contiene 20.000 valores, el resto datos de entrada que necesita el algoritmo planteado son los parámetros de identificación del taladro (nº hta y vida de hta), la velocidad de avance de taladrado y la velocidad de avance de avellanado (ver tabla 2). En las secciones posteriores se ha empleado como referencia el taladro 268 de la herramienta 1 para ilustrar el procedimiento de procesado.

E. Análisis de las señales de fuerzas de mecanizado durante el proceso de taladrado-avellanado

La operación de mecanizado que resulta en este tipo de agujeros consta de dos fases: una primera fase de taladrado encargada de realizar el agujero principal pasante y una segunda fase de avellanado para ejecutar la cavidad cónica a la entrada del taladro. En la morfología de las señales de fuerza, figura 6, se pueden ver reflejadas ambas fases con sus puntos característicos y la zona de transición entre estas.

Las partes de la señal correspondientes al proceso de taladrado y avellanado se ven representadas como una curva que describen las fuerzas sobre el nivel de referencia.

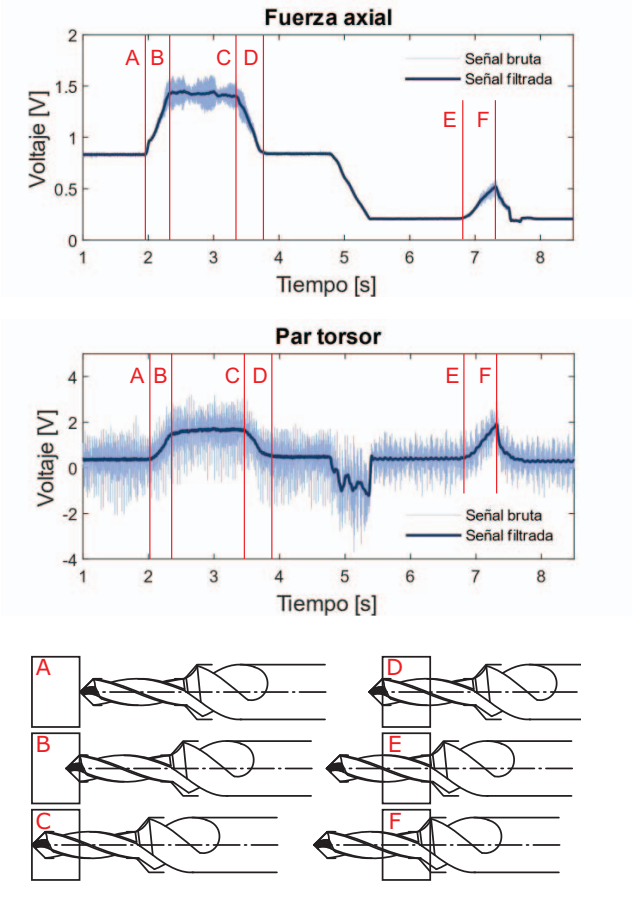


Fig. 6. Evolución temporal de las fuerzas de mecanizado registradas por el dinamómetro durante el proceso de taladrado-avellanado, indicando la posición de la broca respecto a la probeta en los puntos característicos del proceso. Taladro 268 de la herramienta 1.

La señal se mantiene estable en torno al nivel de referencia cuando la herramienta se encuentra girando en vacío. Las alteraciones y cambios en el nivel de referencia que se producen en la parte intermedia de la señal son consecuencia del cambio de parámetros de corte de la máquina en la zona de transición del taladrado al avellanado.

La curva de taladrado se puede dividir en tres etapas. La primera está caracterizada por una pendiente ascendente de la fuerza desde que la punta de la broca contacta con el material (punto A) hasta que ésta penetra por completo (punto B). Durante la segunda etapa se produce el grueso de la eliminación del material y el nivel de la señal se mantiene estable, pero con grandes oscilaciones. La tercera y última etapa corresponde a la salida de la punta de la broca por la cara opuesta de la placa (tramo C - D), de forma que la señal describe una pendiente descendente hasta que la punta emerge por completo y la herramienta vuelve a girar en vacío.

La curva del avellanado se caracteriza por una pendiente ascendente de la fuerza desde que la herramienta comienza a avellanar la probeta (punto E) hasta que está alcanza la profundidad máxima de avellanado (punto F). Esto se debe al progresivo aumento de la sección mecanizada durante la operación. Tras alcanzar la cota final del avellanado, la fuerza desciende hasta volver a estabilizarse en el nivel de offset con la herramienta rotando en vacío.

Como se puede apreciar en la figura 6, la morfología de la señal no es idéntica para las señales de fuerza axial y par torsor, llegando a presentar diferencias sustanciales. No obstante, la tendencia de las etapas mencionadas tanto en la curva de taladrado como en la curva de avellanado se mantiene.

F. Etapa de filtrado

El principal objetivo de la etapa de filtrado es la obtención de la parte estable de la señal mediante la supresión del ruido u otras inestabilidades inherentes al proceso. La intermitente interacción entre el filo de herramienta, las fibras y la resina, fruto de la heterogeneidad de los materiales compuestos, produce un gran volumen de fluctuaciones de las fuerzas de corte. Adicionalmente, se añade la gran variabilidad de las condiciones de corte en entornos de estas características.

Como se puede observar en la figura 6, el valor relativo de las fluctuaciones es bastante superior en la señal de par torsor. La señal de fuerza axial oscila hasta máximos de un ± 40 % mientras que la señal de par torsor en algún tramo llega a oscilar hasta un ± 100 %.

Para el filtrado de la señal, se ha aplicado un filtro paso bajo con frecuencia de corte de 1Hz tras realizar un análisis con distintas frecuencias. Se ha seleccionado este tipo de filtro con el fin de eliminar los ruidos y fluctuaciones de alta frecuencia manteniendo suficiente información de la señal fuente. Los resultados preliminares óptimos relativos a la precisión del método se alcanzaron con este filtro, ya que el método se fundamenta en la tendencia de la señal. Además, posibilitaría trabajar con un menor volumen de datos a nivel industrial dado que permite la utilización de una frecuencia de muestreo menor.

G. Etapa de referenciado de la señal y cambio al dominio de la distancia

La siguiente fase de procesado tiene la finalidad de referenciar la señal respecto al primer punto en que la herramienta toca material. Para ello, se ha empleado un algoritmo sencillo que detecta el comienzo de la primera pendiente ascendente, correspondiente al inicio de la operación de taladrado.

El siguiente paso del tratamiento consiste en pasar la señal del dominio del tiempo al dominio de la distancia. La velocidad de avance de la herramienta ha sido el parámetro empleado para realizar esta transformación, actuando como nexo entre ambos dominios, ya que relaciona el tiempo de la operación con la distancia recorrida por la herramienta en ese periodo. Este paso es fundamental para conocer la distancia que recorre la herramienta durante las distintas fases de la operación. Esta distancia se puede ver reflejada en las señales mostradas en la figura 7.

En la primera fase, desde el primer contacto de la herramienta con el material hasta que la misma recorre 13 mm, la operación se rige por la velocidad de avance de taladrado, en este caso 396 mm/min. En el punto en el que la herramienta ha recorrido 13 mm se produce el cambio de velocidad de avance a la velocidad de avance de avellanado, en este ensayo 180 mm/min. A partir de este punto la operación se rige por la velocidad de avance de avellanado. Como la velocidad de avance de avellanado es inferior a la de taladrado, la herramienta recorre menos distancia en el mismo periodo de tiempo.

H. Etapa de búsqueda de la curva de avellanado

La siguiente etapa de procesado consiste en la búsqueda automática de la parte de la señal correspondiente a la operación de avellanado. El objetivo de la búsqueda automática es que el algoritmo sea capaz de identificar la curva de avellanado en cada una de las distintas señales de los ensayos, las cuales tienen diferentes velocidades de corte y niveles de desgaste, por lo que no siempre localizan exactamente en el mismo sitio.

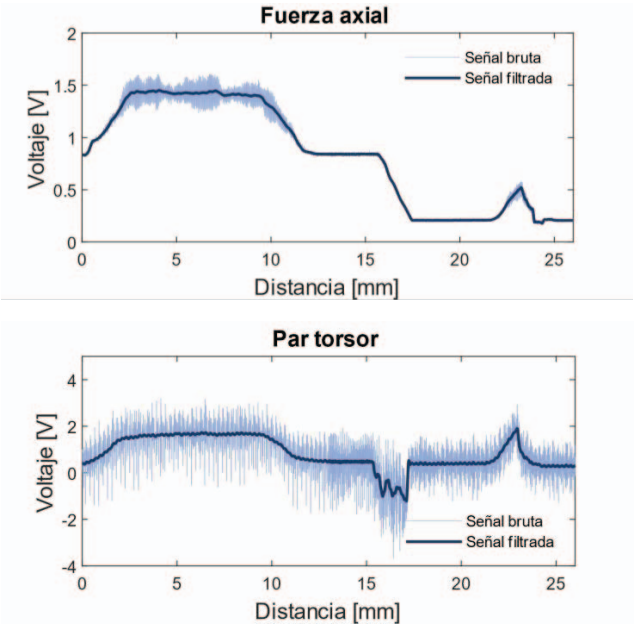


Fig. 7. Evolución de las fuerzas de mecanizado frente a la distancia recorrida por la herramienta desde el primer contacto de la broca con la probeta. Taladro 268 de la herramienta 1.

De este modo, el algoritmo de búsqueda se ha basado en los patrones comunes que comparten todas las señales, siendo ligeramente distintos para las señales de fuerza axial y para las señales de par torsor.

El punto de partida ha sido el cambio de rotación de la herramienta que siempre se efectúa cuando la herramienta ha recorrido aproximadamente 16 mm. Tomando como referencia este punto, a partir del cual se produce la transición completa a los parámetros máquina de avellanado, se aísla la etapa de la señal correspondiente a esta operación.

Para detectar el comienzo de la etapa de avellanado, se aprovecha la particularidad del patrón que sigue la señal durante la transición, para la señal de fuerza axial, un sustancial cambio de offset con pendiente descendiente y, para la señal de par torsor, una oscilación con ligero cambio de nivel.

En el caso de la fuerza axial, empleando el mismo método que para detectar el contacto de la herramienta con el material, se obtiene el punto de estabilización de la pendiente descendente en el nuevo offset. Una vez hallado el punto se desecha la parte de la señal anterior al mismo. De manera análoga, en el caso del par torsor, se detecta el inicio del primer flanco de bajada de la oscilación y posteriormente el final del flanco de subida, de tal forma que la señal queda como se muestra en la figura 8.

I. Método del Triángulo de Avellanado

El siguiente objetivo del tratamiento de la señal es extraer de la curva de avellanado el valor de altura de avellanado.

Como se muestra en la figura 5, el valor de altura de avellanado obtenido del perfil del agujero muestreado con el perfilómetro no tiene en cuenta el radio de acuerdo, considerando como altura de avellanado la altura geométrica del cono truncado que lo caracteriza.

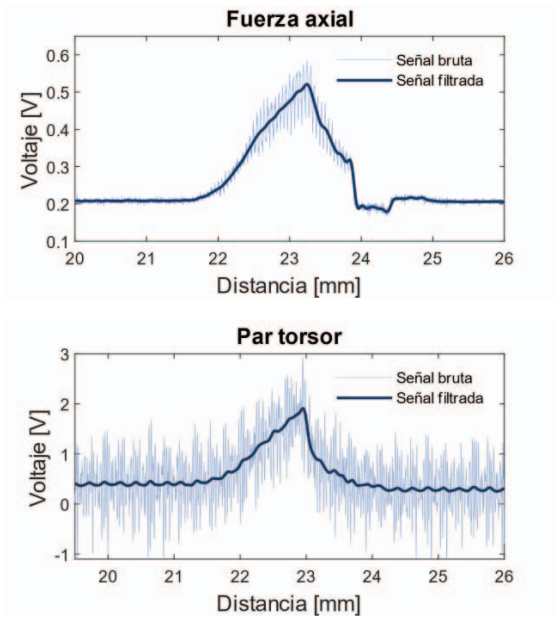


Fig. 8. Curva de fuerzas de mecanizado durante la operación de avellanado. Taladro 268 de la herramienta 1.

Según se ha descrito con anterioridad, el primer instante en el que la herramienta comienza a avellanar el agujero se ve reflejado en la señal como el punto de inicio del ascenso de la fuerza, indicado en la figura 9 como punto A. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura, el tramo inicial del ascenso presenta cierta curvatura hasta que transiciona por completo a la recta característica del avellanado. Esta curvatura se debe al comienzo de la operación de mecanizado en el que la herramienta incide con la parte de su geometría correspondiente al radio de acuerdo y al amortiguamiento que se produce al contactar.

De este modo, para determinar el valor de altura de avellanado de forma consistente con la definición dada, se ha simplificado la curva de avellanado a un triángulo rectángulo con la recta ascendente a la que se aproxima el tramo de la señal registrado durante la operación como hipotenusa.

Para obtener la recta aproximada se realiza la regresión lineal de los puntos que componen esa parte de la señal. El primer punto que se toma como referencia para calcular la altura de avellanado es la intersección entre la recta y el nivel de offset previo al inicio de la operación (punto B). El punto final que se toma para determinar la altura de avellanado es el máximo de la curva de avellanado (punto C). La distancia entre ambos puntos es la medida de la altura de avellanado.

Cabe destacar que aunque se aprecia una notable diferencia en la referenciación de ambas señales dado que los puntos no coinciden en la misma cota, esta diferencia no afecta al desempeño del algoritmo de procesado, ya que la escala de la distancia debajo de la curva de avellanado es la misma.

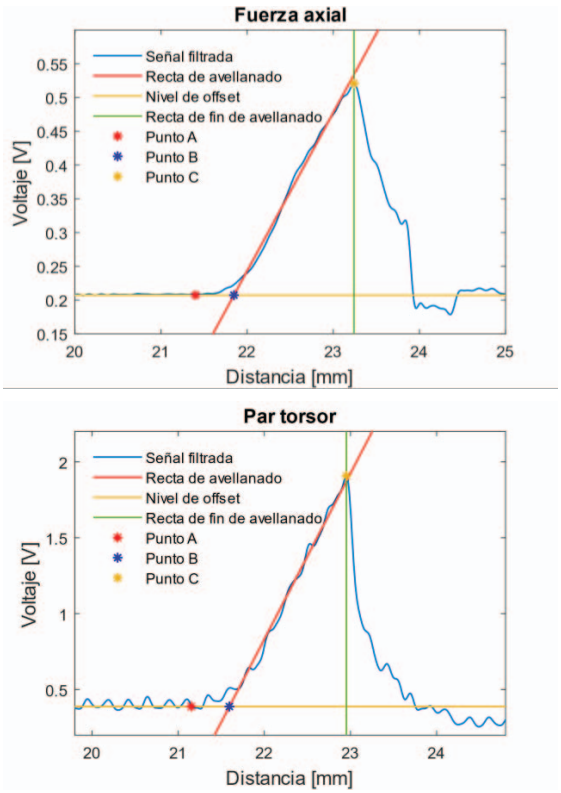


Fig. 9. Determinación de la altura de avellanado mediante el Método del Triángulo de Avellanado. Taladro 268 de la herramienta 1.

III. RESULTADOS

En esta sección se exponen los resultados obtenidos con el perfilómetro de contacto y el procesamiento de fuerzas de mecanizado. Para la visualización de estos se muestran dos tablas: la tabla 3 para los resultados obtenidos a partir de las señales de fuerza axial y la tabla 4 para los obtenidos a partir de las señales de par torsor.

TABLA III. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE LA FUERZA AXIAL

ID Taladro		**Altura de avellanado [mm]**		
Hta	***Vida [nº tal]***	***Perfilómetro***	***Fuerza axial***	***Error Absoluto***
1	98	1,362	1,396	0,034
	268	1,375	1,393	0,018
	366	1,307	1,350	0,043
	465	1,243	1,257	0,014
2	366	1,285	1,344	0,059
	466	1,299	1,331	0,032
3	98	1,321	1,251	0,070
	268	1,397	1,369	0,028
	366	1,337	1,329	0,008
	460	1,407	1,409	0,002
	1152	1,244	1,289	0,045
4	98	1,291	1,349	0,058
	268	1,411	1,533	0,122
	366	1,350	1,384	0,034
	466	1,399	1,508	0,109
Error Absoluto Medio EAM				0,045

TABLA IV. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DEL PAR TORSOR

ID Taladro		**Altura de avellanado [mm]**		
Hta	***Vida [nº tal]***	***Perfilómetro***	***Fuerza axial***	***Error Absoluto***
1	98	1,362	1,258	0,104
	268	1,375	1,359	0,016
	366	1,307	1,294	0,013
	465	1,243	1,279	0,036
2	366	1,285	1,255	0,030
	466	1,299	1,301	0,002
3	98	1,321	1,309	0,012
	268	1,397	1,354	0,043
	366	1,337	1,276	0,061
	460	1,407	1,322	0,085
	1152	1,244	1,284	0,040
4	98	1,291	1,301	0,010
	268	1,411	1,407	0,004
	366	1,350	1,354	0,004
	466	1,399	1,519	0,120
Error Absoluto Medio EAM				0,039

En cada tabla se muestra una comparación del valor de altura de avellanado medido con el perfilómetro frente al calculado con el algoritmo de procesado, incluyendo el error absoluto. Este error se define como el valor absoluto de la diferencia entre ambos valores.

En vista de los resultados obtenidos se observa que a partir del procesamiento de la fuerza axial se consigue medir el valor de la altura de avellanado con un error absoluto medio de aproximadamente 0,045 mm, que supone un error relativo del 3,4 %, y a partir del procesamiento del par torsor con un error absoluto medio de aproximadamente 0,039 mm, que supone un error relativo del 2,9 %.

Ambos errores son del orden de las centésimas de milímetro, de modo que se ha alcanzado un grado de precisión considerable teniendo en cuenta que se trata con señales de estas características. El error obtenido es inferior a la tolerancia empleada actualmente en el proceso industrial, lo que indica el potencial del método para su futura aplicación en la industria.

Los errores de valor notablemente superior al resto se pueden considerar dato atípico, y pueden deberse a disparidades o alteraciones que se produjesen durante los ensayos o la monitorización de las fuerzas.

La diferencia entre el error absoluto medio obtenido del tratamiento de las señales de fuerza axial y de las señales de par torsor puede deberse a las particularidades de cada algoritmo y la propia morfología de la curva de avellanado en cada tipo de señal. No obstante, dado que se han estudiado los resultados de una muestra reducida de señales, no se puede considerar un comportamiento concluyente.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha planteado e implementado un sistema de control de calidad de la altura de avellanado de los agujeros realizados en un sistema de taladrado automático de componentes aeronáuticos estructurales mediante data analytics. Para la aplicación de esta técnica es necesaria la monitorización del proceso mediante sensores para la recogida de datos, en este caso, las fuerzas de mecanizado instantáneas a lo largo de la operación. El procesado de estos datos, las señales de fuerza axial y par torsor, es el paso clave para transformarlos en información y ser capaces de extraer de ella los parámetros de control deseados, en este caso la altura de avellanado. Para el desarrollo del sistema se ha definido con éxito una metodología para calcular de forma automática a partir de las señales el valor de dicho parámetro geométrico con gran exactitud.

El procesamiento de las señales de fuerzas hasta obtener la altura de avellanado presenta grandes retos inherentes al mecanizado de CFRPs debido a la elevada dureza de las fibras y a la heterogeneidad del material, que provoca elevadas fluctuaciones en las fuerzas de mecanizado y un desgaste de herramienta severo que, a su vez, puede inducir alteraciones en las señales. El ruido y las fluctuaciones características de este tipo de procesos suponen gran dificultad a la hora de determinar con precisión y exactitud el valor de la altura de avellanado.

No obstante, el grado de precisión obtenido demuestran el gran potencial de las señales de fuerzas de mecanizado para el control y optimización del proceso. A pesar de haber trabajado con los datos de los ensayos experimentales, los resultados indican que la aplicación de este sistema en el

proceso industrial real es viable y ofrece grandes posibilidades para la optimización de otros aspectos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que será necesario probar la eficacia del sistema para un volumen de operaciones mucho mayor antes de su implementación industrial.

La metodología planteada para el procesamiento de las señales ha resultado ser efectiva para operaciones de taladrado-avellanado con distintos parámetros de corte y distintos niveles de desgaste de herramienta. Esta conclusión resulta muy positiva ya que refleja la versatilidad y flexibilidad del método.

El método de análisis de datos desarrollado ofrece grandes ventajas. En primer lugar, es una técnica no intrusiva con el proceso, es decir, no requiere contacto con los componentes mecanizados ni supone ningún tipo de interferencia con la secuencia de producción, reduciendo los costes asociados. Además, permite el control en tiempo real, dado que en el mismo instante en que se efectúa el agujero ya se dispone de los datos generados durante la operación. De este modo, se puede detener la producción si se detecta un error inadmisible y evitar así su propagación e incluso encontrar la fuente de error.

A nivel industrial, la potencia consumida por el husillo se puede medir con gran facilidad, incluso suele ser información proporcionada por la propia máquina de taladrado. La potencia consumida por el husillo es el producto del par torsor y la velocidad angular. Dado que se trata de magnitudes proporcionales, el método empleado para el procesamiento de las señales de par torsor presenta aplicabilidad cuasi-directa para señales de potencia consumida. Por tanto, la precisión alcanzada mediante el procesamiento de las señales de par torsor resulta prometedora.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de AIRBUS S.A.S a través del proyecto CFT – AI – PJMT - DRILLING PROCESS IMPROVEMENT BASED ON DATA ANALYTICS, la Agencia de Investigación Estatal a través del proyecto ANALYSIS OF DEFECTS IN FIBER-REINFORCED LAMINATES DUE TO MANUFACTURING PROCESSES AND EFFECT ON FATIGUE BEHAVIOR (PID2020-118480RB-C22) y el proyecto DIGITALIZATION OF INDUSTRIAL DRILLING PROCESS (PDC2021-121368-C21), el Ministerio Regional de Educación, Juventud y Deporte de la CAM y el Fondo Social Europeo por la Ayuda para la Contratación de Técnicos de Apoyo a la Investigación (PEJ-2020-AI/IND-18025), el MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR" (PDC2021-121368-C21).

REFERENCIAS

[1] B. Vogel-Heuser y D. Hess, "Guest Editorial Industry 4.0– Prerequisites and Visions," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, n.o 2, pp. 411-413, 2016. doi: 10.1109/TASE.2016.2523639.

[2] da Silva ER, Shinohara AC, Nielsen CP, de Lima EP, Angelis J. "Operating digital manufacturing in industry 4.0: The role of advanced manufacturing technologies." Procedia CIRP, vol. 93, 2020. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.063.

[3] Rubmann M, Lorenz M, Gerbert P, Waldner M, Justus J, Engel P, et al. "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries." The Boston Consulting Group 2015.

[4] Ahuett-Garza H, Kurfess T. "A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing." Manufacturing Letters 2018;15.

[5] Longo F, Nicoletti L, Padovano A. "Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context." Computers and Industrial Engineering 2017;113.

[6] Porter ME, Heppelmann JE. "How smart, connected products are transforming companies." Harvard Business Review 2015;2015.

[7] J. Fernández-Pérez, J. Cantero, J. Díaz-Álvarez y M. Miguélez, "Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling," Composite Structures, vol. 178, pp. 157-161, 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317317828.

[8] A. Díaz-Álvarez, M. Rodríguez-Millán, J. Díaz-Álvarez y M. Miguélez, "Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites," Composite Structures, vol. 202, pp. 1136-1144, 2018, Special issue dedicated to Ian Marshall. doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.068. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318306822.

[9] E. Rahim, M. Rahim, M. Ibrahim, A. Hilmi y M. L. Baharudin, "Performance Evaluation of Countersink Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)," en feb. de 2021, pp. 537-545. doi: 10.1007/978-981-15-9505-9_48.

[10] B. Liu, C. Yan y H. Wang, "Effects of countersunk hole's geometrical deviation on the strength of bolted carbon fiber–reinforced plastic/polymer metal joints under tensile loading," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 234, p. 095 440 541 986 360, jul. de 2019. doi: 10.1177/0954405419863608.

[11] X. Qin et al., "Effects of countersunk hole geometry errors on the fatigue performance of CFRP bolted joints," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 236, n.o 4, pp. 337-347, 2022. doi: 10.1177/09544054211028534.

[12] Y. Zhang, Y. Gai y K. Chen, "Investigation on the countersink errors in the drilling of thin-wall stacked structures," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 108, jun. de 2020. doi: 10.1007/s00170-020-05546-w.

[13] Y. Zhang, K. Chen y K. Hu, "Prediction and compensation of countersinking depth error in drilling of thin-walled workpiece," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 105, nov. de 2019. doi: 10.1007/s00170-019- 04343-4.

[14] Y. Zhang y D. Wu, "Optimization design for countersink depth error prediction and compensation of CFRP/Al stacks," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1507, p. 042 001, abr. de 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1507/4/042001.

[15] X. Ma et al., "An approach to countersink depth control in the drilling of thin-wall stacked structures with low stiffness," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 95, mar. de 2018. doi: 10.1007/s00170-017- 1234-9.

[16] Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D. "Advanced monitoring of machining operations." CIRP Annals - Manufacturing Technology 2010;59.

[17] Kim HY, Ahn JH, Kim SH, Takata S. "Real-time drill wear estimation based on spindle motor power." Journal of Materials Processing Technology 2002;124.

[18] Romoli L, Lutey AHA. "Quality monitoring and control for drilling of CFRP laminates." Journal of Manufacturing Processes 2019;40.

[19] C. Domínguez-Monferrer, J. Fernández-Pérez, R. D. Santos, M. H. Miguélez, and J. L. Cantero, "CFRP drilling process control based on spindle power consumption from real production data in the aircraft industry", vol. 107, pp. 1533–1538, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.187.

Mechanical properties enhancement for additive manufactured short fiber composites with salt remelting post-processing

Mejora de las propiedades mecánicas para compuestos de fibras cortas fabricados por manufactura aditiva con post-procesamiento de recocido en sal

Dilio Alberto Long O.
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
dilio.long@utp.ac.pa

Maria De Los Á. Ortega Del Rosario
Department of Mechanical Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
maria.ortega@utp.ac.pa

Salvatore Brischetto
Department of Mechanical and Aerospace Engineering
Politecnico di Torino
salvatore.brischetto@polito.it

***Abstract*— Fused Filament Fabrication (FFF) stands out in several areas as the most used additive manufacturing (AM) process. FFF initially started as a rapid prototyping technology, known as 3D printing, but now has gained throughout the years the potential to produce functional parts straight from a 3D model with less required equipment compared to traditional manufacture. The idea of producing functional end-products through FFF has stood in the mind of researchers for the past years, encouraging significant research on this technology and expanding the FFF technology to the capabilities of composite materials with short and continuous fiber reinforcements. Moreover, this technique provides attractive economic and design opportunities. However, a notorious gap in traditional composites manufacture and FFF shows the many flaws in the mechanical properties of this AM technology, such as poor interface bonding, high roughness, and concentration of voids within the structure. This research evaluates a recently implemented salt remelting heat treatment for FFF on short carbon fiber reinforced polylactic acid. These experiments show an increase in the tensile elastic properties by 135% and the elastic region for parts likely to fail for delamination, using non-pulverized sea salt for cooking applications, tested through the ASTM 3039D norm for tensile testing composite materials.**

Keywords—additive manufacturing, composites, FFF, heat treatment, mechanical properties.

***Resumen* — La fabricación con filamento fundido (FFF) destaca en varios ámbitos como el proceso de manufactura aditiva (AM) más utilizado. La FFF comenzó como una tecnología de prototipado rápido, conocida como impresión 3D, pero ahora ha ganado a lo largo de los años el potencial de producir piezas funcionales directamente a partir de un modelo 3D con menos equipo necesario en comparación con la fabricación tradicional. La idea de producir productos finales funcionales a través de la FFF ha permanecido en la mente de los investigadores durante los últimos años, fomentando una significativa investigación sobre esta tecnología, y ampliando la tecnología FFF a las capacidades de los materiales compuestos con refuerzos de fibras cortas y continuas. Además, esta técnica brinda atractivas oportunidades económicas y de diseño. Sin embargo, una brecha notoria en la fabricación de materiales compuestos tradicionales y la FFF muestra los numerosos defectos en las propiedades mecánicas de esta tecnología de AM, tales como: mala unión de la interfase, alta rugosidad y concentración de vacíos dentro de la estructura. Esta investigación evalúa un tratamiento térmico de refundición de sal recientemente implementado para FFF en ácido poliláctico corto reforzado con fibra de carbono. Estos experimentos muestran un aumento de las propiedades elásticas de tracción en un 135% y de la región elástica para las piezas susceptibles de fallar por delaminación, utilizando sal marina no pulverizada para aplicaciones de cocción, probada a través de la norma ASTM 3039D para ensayos de tracción de materiales compuestos.**

Palabras claves —manufactura aditiva, materiales compuestos, FFF, tratamiento térmico, propiedades mecánicas.

I. INTRODUCTION

Many industries rely on multistep chain-production processes to manufacture high-resistance composite materials, such as autoclave furnaces, automatic laminate deposition assisted by robotic arms (ATL), automatic fiber deposition (AFP), pultrusion, filament winding, upon many other processes. The critical reason is that these processes can provide a high-performance-lightweight composite structure [1]. However, difficulties arise for traditional chain processes when manufacturing complex structures with a high concentration of cavities in their design for weight reduction. Therefore, the AM, with its ability to manufacture complex structures while requiring less equipment, has maintained the scope of the aeronautical industry, focusing primarily on the AM for metal matrix structures [2–4]. On the other hand, the aerospace industry also has AM under its research activities to construct future lunar applications and composite structures

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00118

[5–7]. However, a considerable challenge in the technology stands in the AM way for its application in a broader industry range. Thus, intensive research has been taking place to optimize AM technologies and reduce their drawbacks [8, 9]. These research go beyond structural engineering, reaching biomedicine and bioengineering applications nowadays, allowing the fabrication of tailored muscular tissue and personalized lightweight prosthetics with AM technologies.

Nonetheless, the main drawback due to low mechanical properties, micrometer precision, and required processing temperatures for some materials persist in all the previously mentioned sectors [10]. Pereira et al. [11] compared AM to traditional Manufacturing, showing that AM provides greater design freedom at the cost of a high initial inversion and training; adding the technology's status makes it less attractive for big manufacturers. Am's goal is not to replace the complete traditional manufacture but to serve as a tool, as it shows to be better suited and tested for on-demand noncritical components. A model proposed for AM takes advantage of the reduced equipment requirement, where the retailer purchases or gets the license from the designer to fabricate through 3-D printing the required product by the customer while adding the possibility to tailor the product to the customer's needs, reducing the costs in logistics and the option for products tailored to the customer's needs [12, 13].

The AM technologies can be classified based on the required application and material selection, ranging from polymers, metals, and ceramics. Metal alloys account for the most extensive available equipment, commonly seen in the aerospace and automotive industry, representing 47.8% of AM [14, 3]. In the second place, polymer matrix composites maintain a high interest throughout the sectors aiming for structural applications, where short and continuous fiber serves as the main reinforcing components for the fiber-reinforced composites (FRP) [14, 6]. Currently, several AM technologies can work with short fiber reinforcements, just a few with continuous fibers, and even less if both are desired, depending on the required AM technology. One such technology capable of working with both types of fiber reinforcements is the F.F.F., previously known by its patent name Fused Deposition Modeling (FDM), while also being accessible in the market. However, FFF processes maintain disadvantages such as a high concentration of voids, interface bonding, and strong influence on the fabrication parameters [15, 16].

Recognizing the advantages and challenges of the FFF., several post-processing techniques have been under development to reduce the final product's flaws from using this AM technique. Some techniques used as post-processing are the chemical vapor smoothing process with Tetrahydrofuran (THF) [17], and acetone [18] for decreasing the surface roughness, thermal annealing with [19] or without [20] a protective medium between the treated object and the heat source, and nano-frequency wielding at the interface of the material [21]; both processes applied for enhancing the mechanical properties of the final product. To this date, research is still carried out on these and other post-processing techniques to reduce the outcomes from FFF. Therefore, this research focuses on determining the effect on the characterized mechanical properties of the non-treated specimen after being treated with a salt remelting process and evaluated through a 4-sigma capability analysis to ensure the stability of the study.

Section II broads the design of the experiment, design and fabrication parameters according to the norms and previous studies. Section III covers the experimental results, discussion, and validation through statistical analysis, concluding this study with Section IV covering the remarks from the research and further research recommendations.

II. Design of Experiment

A. Printing parameters

F.F.F. processes are highly influenced by the printing parameters established by the designer, such as extrusion temperature, extruder diameter, and speed; raster angle, width, infill percentage, and layer thickness remain. Several studies have analyzed these parameters thoroughly [22–25, 16]. To keep the Degrees of Freedom (DoF) in the experiment at minimum the printing parameters at TABLE I. are maintained constant for all the printed specimens excluding the raster angle for the infill, which is set to: 90° and ±45° to study the effect in the mechanical properties. When testing polymeric materials, the most used norm is the ASTM D638 which allows a diverse range of specimen geometries and scales; however, for testing F.R.P., the recommended norm changes to the ASTM norm D3039. Several studies on polymeric materials have been tested using this norm providing guidance for printing parameters, geometry recommendations, and observations Fig. 1 for consistent results [26–28]. For the fabrication of the specimens, the G-code required by the printers was generated with the software Simplify3D ®. A total of 10 non-treated specimens were fabricated, subdivided into five specimens for each direction. A code was used for naming each specimen based on the infill direction, treatment (TX), and specimen number (S.N.).

TABLE I. Printing parameters selected for the fabrication of the tensile specimens

Layer height	0.1	mm
Default printing speed	3600	mm/min
Infill density	100	%
Perimeter layers	2	---
Bottom/Top layers	5	---
Printing temperature	220[a]-215[b]	°C
Bed temperature	60[a]-50[b]	°C
First layer height	0.2	mm
Outline under-speed	1800	mm/min
Infill speed	2880	mm/min

[a.] For the first three printed layers

[b.] For the rest of the printing

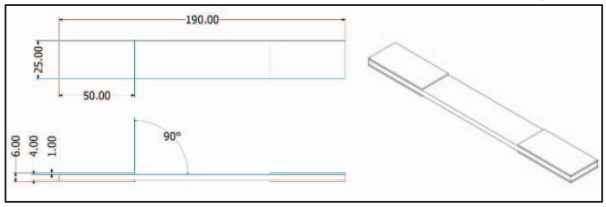


Fig. 1. Geometric parameters for the tensile specimens with 90° of raster angle for the infill.

B. Equipment and materials

The Intamsys™ Funmat HT FFF printer with a 0.4 mm stainless steel nozzle was the equipment used to manufacture the tensile specimens. The selected material was a short carbon fiber reinforced polylactic acid (SCFRPLA.) from the manufacturer SUNLU. These choices were based on their

availability in Europe and the Americas, adding their workability on most commercial printers.

C. Salt remelting

The setup consisted of a stainless-steel basin for cooking applications made of AISI steel 316, approximately 1.6 mm of thickness, settled inside an electric furnace at a temperature of 200 °C for 1 hour and let cool to ambient temperature. Fine grain sea salt for cooking applications was selected as the protective selective medium due to its thermal properties since it can reach temperatures beyond the extrusion temperatures of the PLA and many other materials used for FFF, such as Polyether ether ketone (PEEK) and Polyethylene terephthalate glycol (PETG) without risking chemical reactions or the fusion temperature of the protective medium. Each specimen was treated individually and buried with a minimum salt layer thickness of 10 mm. The steel basin was sealed with a thin aluminum fold and a stainless-steel cover to avoid direct contact between the salt and the furnace Fig. 2.

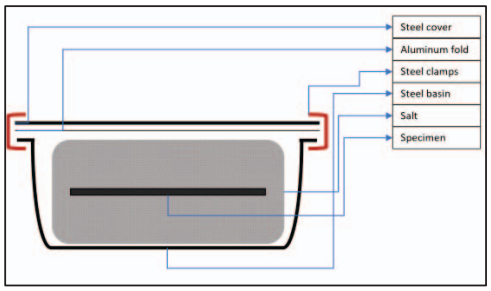


Fig. 2. Representative diagram of the setup used for the salt remelting process.

D. Geometry analysis

To validate the geometry with the design norms from the ASTM D3039, a capability analysis with 4-sigma criteria was conducted in the middle section on each of the specimens with a total of 10 observations at the gage region, measuring their width (Fig. 3) and thickness (Fig. 4).

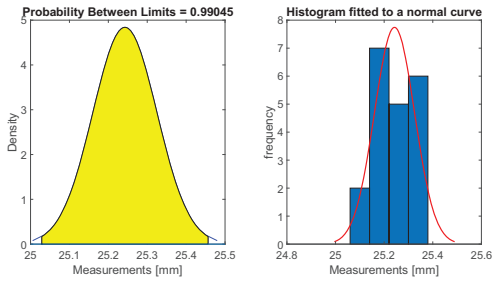


Fig. 3. Density and frequency curves for the measured width at the gage region of the specimens.

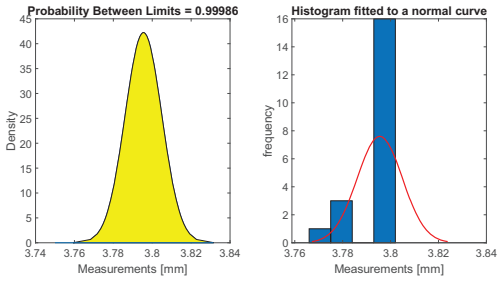


Fig. 4. Density and frequency curves for the measured thickness at the gage region of the specimens.

The capability analysis of the fabrication process concluded with a p-value equal to 1 ensuring the stability of the fabrication process. Consequently, compared to the actual required values in Fig. 1, notorious deviations can be observed in TABLE II. The ASTM 3039D sets a tolerance of $\pm 1\%$ for the width and $\pm 4\%$ for the thickness of the specimens. The specimens achieved the width requirements but did not comply with the required thickness tolerance; nonetheless, the specimens were evaluated by the research team and considered suitable for testing. Since the drop is due to overlapping printed layers, this can be corrected by adapting the printing parameters for future prints. No precision equipment was available for measuring the true length of the specimens; therefore, it was considered as its nominal value of 190 mm.

TABLE II. MEAN AND STANDARD DEVIATION FROM THE CAPABILITY ANALYSIS CONDUCTED AT THE GAGE SECTION OF THE SPECIMENS.

	Mean	Standard deviation	Units
Width	25.2	0.05	mm
thickness	3.80	0.01	mm

E. Tab geometry and assembly

The use of Tabs for the specimens is primarily a recommendation for transferring the loads during the tensile testing; therefore, the material selected for the tabs was non-reinforced P.L.A. keeping the 0.1 mm layer height. The geometric parameters of the tab described in Fig. 1, such as width and thickness are kept constants for all the specimens. Changes in the tab angle were introduced for the specimens printed with the $\pm 45°$ infill; the tab angle was reduced from 90° to 10° for norm recommendation and observations from testing in previous studies while maintaining the thickness and upper surface of 50 mm constant [29, 28, 26]. An epoxy glue UHU Bostik D2870 with adhesive strength of 6.86 MPa, was used to adhesive the tabs to the specimens. To further improve the adhesion, sandpaper was used to scrape the contact surfaces, and then it was proceeded to clean any remaining dust [28]. The epoxy glue manufacturer recommended 20 minutes under pressure after joining for better adhesion; thus, each specimen was left from 40 to 45 minutes under pressure by using paper clamps.

III. RESULTS

The specimens were divided into two categories based on the applied treatment:

- T0: for the non-treated specimens.
- T2: for the salt remelted specimens.

In Fig. 5, it can be observed that the T2 specimens show an increase of 2.0% in the plastic deformation and a decrease of 1.7% in the maximum elongation at break compared to the T0 specimen's small plastic region. However, all specimens maintained a fracture of brittle nature. The T2 SN01 failed prematurely from not receiving the treatment in a wide area near the gage region, unlike T2 SN02 which the treatment affected the whole specimen.

Stress-strain curves were obtained from the data by using (1) and (2). By applying Hook's law (3) and linear regression

with a threshold value of R^2=99.95% was used to obtain the material's Elastic modulus recommended by the ASTM 3039D [29]. The maximum stress was determined by (1) applying the maximum force recorded with the geometric data.

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

$$\varepsilon = (l - l_0)/l_0 \quad (2)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

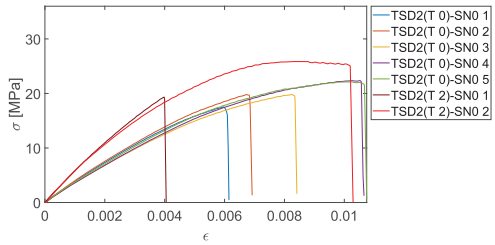


Fig. 5. Stress-strain comparison curves for the T0 and T2 specimens with 90° infill.

During the testing of the T2 ±45° specimen, it showed failure at the grip during the early stages of the test Fig. 6. This premature failure was due to notorious deformation on this specimen, making it harder to join the tabs. The salt remelting proved to increase 135% of the material's elastic modulus and 27.1% of the maximum stress of the material (see TABLE III.). These results can imply a viability of applying a salt remelting process for F.F.F. parts whose load is perpendicular to its infill. However, further testing is needed to comply with the ASTM 3039D fully. Compared to the results of Szust and Adamski [19], a 300% increase in the elastic modulus is possible when using powder salt. Prominent levels of rugosity were observed at the surface of the T2 specimens, where an increasing crack was observed due to high concentration of imperfections at the surface as consequence of the grain size of the salt.

A capability analysis with 4 sigma criteria was conducted on the E_{22} at Fig. 7 and G_{12} at Fig. 8 for the T0 specimens resulting in probability within limits of 0.999 for E_{22}, G_{12}, and σ^{22}_{max} at Fig. 9, including a two-sided confidence interval of 95% and quantile-quantile plot for normal distribution evaluation. These observations indicate that the elastic modulus can be normalized. However, further testing is required to normalize σ^{22}_{max}.

TABLE III. MECHANICAL PROPERTIES OF T0 AND T2 SPECIMENS

Modulus	T0		T2		Units
	mean	Standard deviation	mean	Standard deviation	
E_{22}	3146.8	372.16	7405.0	976.868	MPa
G_{12}	4308	127.18	7919.2[c]	---[c]	MPa
$\sigma_{max}{}^{22}$	20.3	2.08	25.8	---	MPa

[c]. Non-considerable due to premature failure at the grip

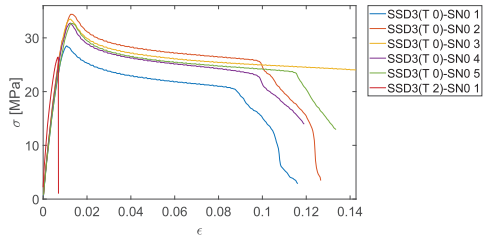


Fig. 6. Stress-strain curve comparison for the T0 and T2 specimens with ±45° infill.

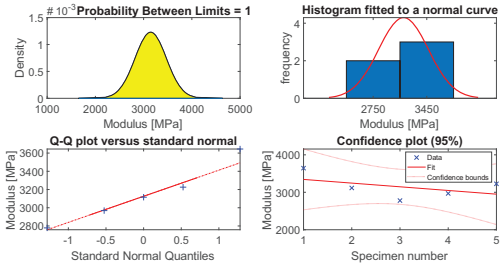


Fig. 7. Capability analysis for the elastic modulus E_2 obtained from the T0 specimens SN01 to SN05.

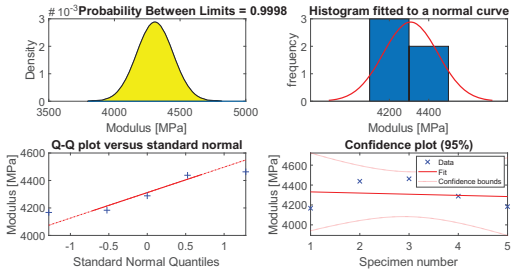


Fig. 8. Capability analysis for the shear elastic modulus G_{12} obtained from the T0 specimens SN01 to SN05.

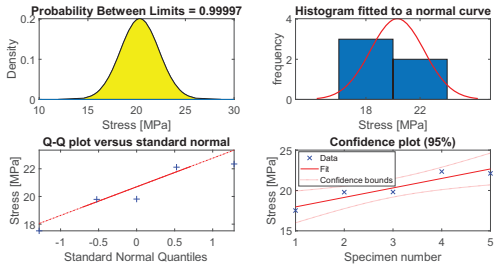


Fig. 9. Capability analysis for the σ^{22}_{max} obtained from the T0 specimens SN01 to SN05.

IV. CONCLUSION

This study tested a salt remelting process to enhance mechanical properties in additively manufactured specimens of carbon fiber P.L.A. composites. It showed positive results with an increase in the specimen's mechanical properties; however, further testing is needed to characterize the enhancement in the material properties caused by the thermal treatment. Further research could be implemented to determine the effects of the proposed treatment on the

geometry and fatigue modulus for complex hollow structures serving as hollow beams for lightweight remote piloted vehicle applications.

Moreover, more observations are needed to determine the treatment's effect on premature failure and the mechanical properties.

ACKNOWLEDGMENT

This research was possible with the financial aid provided by the International Affairs office and the Faculty of Mechanical Engineering (https://fim.utp.ac.pa/) of Universidad Tecnológica de Panamá (https://utp.ac.pa/) and the Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación of Panamá (https://www.senacyt.gob.pa/) through the project FIED22-13. Additionally, the authors would like to acknowledge the equipment and assistance provided by the A.S.T.R.A. research team from the Department of Aerospace and mechanical engineering of the Politecnico di Torino (https://www.dimeas.polito.it/en/research/research_groups/astra_additive_manufacturing_for_systems_and_structures_in_aerospace).

V. REFERENCES

[1] U. P. Breuer, "Manufacturing Technology," in *Commercial Aircraft Composite Technology*, Switzerland, Springer Cham, 2016, pp. 73-132.

[2] S. Singamneni, Y. Lv, A. Hewitt, R. Chalk, W. Thomas and D. Jordison, "Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review," *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering,* vol. 8, no. 1, p. 1, 2019.

[3] C. G. Ferro, S. Varetti, F. Vitti, P. Maggiore, M. Lombardi, S. Biamino, D. Manfredi and F. Calignano, "A Robust Multifunctional Sandwich Panel Design with Trabecular Structures by the Use of Additive Manufacturing Technology for a New De-Icing System," *Technologies,* vol. 5, no. 2, p. 35, 2017.

[4] C. Ferro, R. Grassi, C. Secli and P. Maggiore, "Additive Manufacturing Offers New Opportunities in UAV Research," *Procedia CIRP 41,* vol. 48, pp. 1004-1010, 2016.

[5] N. Labeaga-Martínez, M. Sanjurjo-Rivo, J. Días-Álvarez and J. Martínez-Frías, "Additive Manufacture for a Moon Village," *Procedia Manufacturing,* vol. 13, pp. 794-801, 2017.

[6] N. Yaragatti and A. Patnaik, "A review on additive manufacturing of polymer composites," *Materialstoday: Proceeding,* vol. 44, no. 6, pp. 4150-4157, 2021.

[7] A. Bacciaglia, A. Ceruti and L. Alfredo, "Towards Large Parts Manufacturing in Additive Technologies for Aerospace and Automotive applications," *Procedia Computer Science,* vol. 200, no. 1, pp. 1113-1124, 2022.

[8] A. Zocca, J. Wilbig, A. Waske, J. Günster, M. Putra Widjaja, C. Neumann, M. Clozel, A. Meyer, J. Ding, Z. Zhou and X. Tian, "Challenges in the Technology Development for Additive Manufacturing in Space," *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacture Frontiers,* vol. 1, no. 1, 2022.

[9] B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks, j. Pitot, E. Lopez, M. Leary, F. Berto and d. P. Anton, "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design,* vol. 209, 2021.

[10] E. Rezvani Ghomi, F. Khosravi, R. Esmaeely Neisiany, S. Singh and S. Ramakrishna, "Future of additive manufacturing in healthcare," *Current Opinion in Biomedical Engineering,* vol. 17, no. 1, p. 100225, 2021.

[11] T. Pereira, J. V. Kennedy and J. Potgieter, "A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job," *Procedia Manufacturing,* vol. 30, no. 1, pp. 11-18, 2019.

[12] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materialsyoday,* vol. 21, no. 1, pp. 22-37, 2018.

[13] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Business Horizons,* vol. 55, no. 2, pp. 155-162, 2012.

[14] M. Bhuvanesh and S. P, "Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges," *Thin-Walled Structures,* vol. 159, p. 107228, 2021.

[15] N. Van de Werken, H. Tekinalp, Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams and M. Tehrani, "Additively manufactured carbon-fiber reinforced composites: state of the art and persective," *Additive Manufacture,* vol. 31, p. 100962, 2020.

[16] D. V, K. P. Manoj Kumar, P. M. Bupathi Ram, M. Ravichandran and M. Vinayagamoorthy, "A review on recent advancements in fused deposition modeling," *Materialstoday: Proceedings,* vol. 27, no. 2, pp. 752-756, 2020.

[17] A. J. Rajan, M. Sugavaneswaran, B. Prashanthi, S. Deshmukh and S. Jose, "Influence of Vapor Smoothing Process Parameters on Fused Deposition Modelling Parts Surface Roughness at Different Build Orientations," *Materialstoday: Proceedings,* vol. 22, no. 4, pp. 2772-2778, 2020.

[18] K. Kalyan, J. Singh, G. Singh Phull, S. Soni, H. Singh and G. Kaur, "Integration of FDM and vapor smoothing process: Analyzing properties of fabricated ABS replicas," *Materialstoday: Proceedings,* vol. 5, no. 14, pp. 27902-27911, 2018.

[19] A. Szust and G. Adamski, "Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints," *Engineering Failure Analysis,* vol. 132, p. 105932, 2022.

[20] K. Sathish Kumar, R. Soundararajan, G. Shanthosh, P. Saravanakumar and M. Ratteesh, "Materialstoday," *Proceedings,* vol. 45, no. 2, pp. 2186-2191, 2021.

[21] C. B. Sweeney, B. A. Lackey, M. J. Pospisil, T. C. Achee, V. K. Hicks, A. G. Moran, B. R. Teipel, M. A. Saed and M. J. Green, "Wielding of 3D-printed carbon nanotube-polymer composites by locally induced microwave heating," *ScienceAdvances,* vol. 3, no. 6, 2017.

[22] S. J. Raykar and D. M. D'Addona, "Selection of Best Printing Parameters of Fused Deposition modeling using VIKOR," *Materialstoday: Proceedings,* vol. 27, no. 1, pp. 344-347, 2020.

[23] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, U. Arifin and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering,* vol. 11, no. 1, pp. 639-649, 2021.

[24] J. m. Chacón, M. A. Caminero, P. J. Núñez, E. García-Plaza, I. García-Moreno and J. M. Reverte, "Additive manufacture of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties," *Composite Science and Technology,* vol. 181, p. 107688, 2019.

[25] S. Khabia and J. K. K, "Comparison of mechanical properties of components 3D printed from different brand ABS filament on different FDM printers," *Materialstoday: Proceedings,* vol. 26, no. 2, pp. 2907-2914, 2020.

[26] S. Brischetto and R. Torre, "Reinforcing Effect of Strain Gauges on 3D Printed Polymers: An Experimental Investigation," *Engineering & Applied Sciences,* vol. 14, no. 1, pp. 7-24, 2021.

[27] R. Torre, S. Brischetto and I. Rocco Dipietro, "Buckling developed in 3D printed PLA cuboidal samples under compression: Analytical, numerical and experimental investigations," *Additive Manufacturing,* vol. 38, no. 1, p. 101790, 2021.

[28] R. Torre and S. Brischetto, "Experimental characterization and finite element validation of orthotropic 3D-printed polymeric parts," *International Journal of Mechanical Sciences,* vol. 219, p. 107095, 2021.

[29] American Society for Testing and Materials, *D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,* Pennsylvania: ASTM, 2017.

University class schedule assignment by a Tabu Search Algorithm

Asignación de horarios universitarios mediante un algoritmo Tabú Search

José Javier Laguardia
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
jose.laguardia@utp.ac.pa

Javier Antonio Flores
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
antonio.flores@utp.ac.pa

***Abstract*— Historically, the University class scheduling problem has been difficult to solve efficiently, due to the long time it takes to find satisfactory solutions.**

This work seeks to automate the process that solves the following problem: assign to each mathematics class of an academic period of the Universidad Tecnológica de Panamá (Task) a professor from the Department of Exact Sciences (Resource) of said institution.

In an academic period, the Department of Exact Sciences has approximately 205 subjects and 71 professors. Due to the huge space of possible solutions, a local search has been chosen, in which iteratively tries to improve the solution through slight changes. The effective implementation of this search requires solving two great challenges.

First, define an objective function that allows considering the most important qualities of an assignment, and at the same time control its computational complexity, allowing multiple iterations to be carried out in a reasonable time.

Second, toast to the search for a structure. The problem will start from a solution obtained by means of a greedy algorithm, where for each subject, a teacher is assigned so that the lowest value of the objective function is recorded. Subsequently, the search is provided with a Tabu Search metaheuristic that allows it to escape local optima and better control its path.

The results obtained show evidence that the metaheuristic works, providing a fast feasible solution that includes the desired characteristics and that serve as a starting point for the career coordinator.

Keywords—Tabu Search, Scheduling problem, Metaheuristic, Optimization.

***Resumen* — Históricamente, el problema de asignación de horarios universitarios ha sido difícil de resolver eficientemente, debido al tiempo prolongado que conlleva encontrar soluciones satisfactorias.**

En este trabajo se busca automatizar el proceso que soluciona el siguiente problema: asignarle a cada materia de matemáticas de un periodo académico de la Universidad Tecnológica de Panamá (Tarea) un profesor del Departamento de Ciencias Exactas (Recurso) de dicha institución.

En un periodo académico, el departamento de Ciencias Exactas tiene aproximadamente 205 materias y 71 profesores. Debido al enorme espacio de soluciones posibles, se ha optado por una búsqueda local, en la que iterativamente se intenta mejorar la solución mediante ligeros cambios. La implementación efectiva de esta búsqueda requiere resolver dos grandes desafíos.

Primero, definir una función objetivo que permita considerar las cualidades más importantes de una asignación, y al mismo tiempo controlar su complejidad de cálculo permitiendo realizar múltiples iteraciones en un tiempo razonable.

Segundo, brindar a la búsqueda de una estructura. El problema partirá de una solución obtenida mediante un algoritmo greedy, en donde para cada materia, se le asigna un profesor de forma que registre el menor valor de la función objetivo. Posteriormente se dota a la búsqueda de una mateheurística Tabú Search que permita escapar de óptimos locales y controlar mejor su recorrido.

Los resultados obtenidos muestran evidencia de que la metaheurística funciona, brindando una solución factible rápida que recoge las particularidades deseadas y que sirven de punto de partida para el coordinador de carrera.

Palabras claves — Tabu Search, Asignación de horarios, Metaheurística, Optimización.

I Introducción.

El problema de asignación de horarios universitarios [1], en su forma general, puede ser definido como sigue:

Asignar a un conjunto de tareas T que deben ser completadas, un recurso R (por lo general personas o máquinas), que se tienen a disposición.

Es decir, encontrar una asignación o aplicación $f: T \rightarrow R$ que cumpla con los requerimientos y restricciones del problema. Sin embargo, generalmente los recursos tienen capacidad limitada para realizar tareas, y no toda aplicación cumple con las restricciones.

Las tareas requieren tiempo, y usualmente también requieren de un espacio físico para ser completadas. Sin embargó en este problema se considera que cada tarea ya tiene asignado un entorno, esto es, tiempo y espacio para poder completarla.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00119

La restricción fundamental que se asume, para todas las instancias del problema de asignación, es la imposibilidad para un recurso de ejecutar dos tareas simultáneamente. Sin embargo, la identificación subsiguiente de características similares para el problema general de asignación se hace más difícil. No hay una manera obvia de abstraer más características fundamentales, de manera tan sucinta y simple como la anterior.

Los problemas de asignación horaria tienen la característica que pertenecen a la clase de problemas NP-complete en casi todas sus variantes [2].

Existen una variedad de métodos descritos en la literatura para resolver este tipo de problemas. Estos métodos se pueden dividir en cuatro tipos: métodos secuenciales [3], métodos de cauterización [4], métodos basados en restricciones [5], y los métodos metaheurísticos [6]. Entre estos últimos se pueden enumerar el método de recocido simulado, Tabú Search, genéticos, métodos híbridos, entre otros.

Este trabajo propone una metodología basada en un Tabú Search, este método fue propuesto por Fred Glover [9] y su característica distintiva es el uso de una memoria adaptativa, llamada lista tabú y de una estrategia de exploración. Su ventaja frente a otros métodos como el genético es su mayor velocidad ya que si usáramos un genético el tamaño del cromosoma podría hacer demorar la convergencia de la solución.

La estructura del Tabú Search, tal como se ve en la figura 1, inicia generando una solución inicial igual que un método de búsqueda local donde cada nueva solución se obtiene partiendo de la anterior a partir de una operación denominada movimiento, este define un conjunto N de vecindad formado por todas las soluciones que se alcanzan realizando un movimiento.

Así se sigue un proceso donde en cada movimiento se busca minimizar la función objetivo f(x). Sin embargo, este método termina cuando se llega a un óptimo local ya que todos los movimientos posibles empeoran la solución.

El Tabú Search permite escapar de los mínimos locales permitiendo explorar nuevas soluciones con el uso de movimientos que deterioran la función objetivo para ello se utiliza una lista Tabú que recoge características no deseadas en un momento dado en la búsqueda local obteniendo un nuevo conjunto N*, la lista Tabú más frecuentemente usada recoge los últimos movimientos, de forma que ahora se elige la mejor solución posible entre las disponibles. De esta forma se puede escapar de un óptimo local al prohibir regresar a esta ya que el movimiento sería Tabú. Este proceso se repite mientras se cumpla un criterio de parada, usualmente determinado por el tiempo o número de iteraciones. La solución final será la mejor solución encontrada durante todo el proceso.

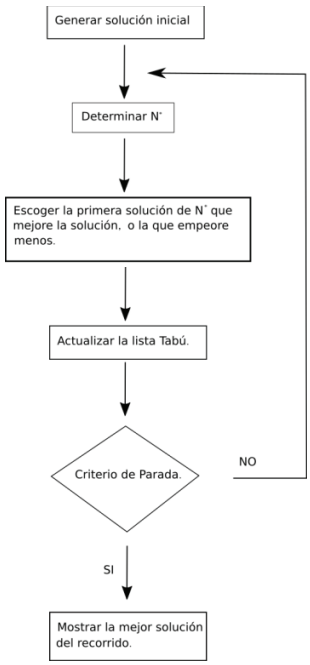


Figura 1: Estructura de un Tabú Search

II Caso de estudio

Nuestro problema puede ser considerado como una instancia particular del problema general de asignación y consiste en lo siguiente:

Al inicio de cada periodo académico, se tienen definidas las materias de matemáticas que se impartirán en el campus central de la Universidad Tecnológica de Panamá. Cada materia cuenta con su espacio físico (su salón de clases) y su horario previamente definido. El problema se reduce entonces a asignarle a cada materia, un profesor del departamento de ciencias exactas de la institución.

Sea P el conjunto de profesores y M el conjunto de materias que asignarle un profesor de P, entonces toda aplicación $f: M \rightarrow P$ cumple, en teoría, con el requerimiento fundamental del problema, aunque en su mayoría serán no deseables. A nuestro espacio de todas las soluciones o asignaciones posibles, se llama A.

Para nuestro caso de estudio, M tiene 205 elementos y P tiene 71. Por tanto, existen 71^{205} aplicaciones posibles entre M y P.

No toda asignación es apropiada o factible. Es imposible para un profesor dar clases para dos materias distintas, en dos salones distintos, de manera simultánea. Una solución que tenga asignadas dos materias con tiempos de clases en común a un mismo profesor es una asignación completamente inútil.

Para detectar estas soluciones problemáticas se usa la función objetivo de forma que introduzca penalizaciones, así una asignación factible tendrá un valor de función objetivo de cero.

Como primer paso se determina a cada profesor de un horario como una matriz H de 19 filas (horas de clase por día) y 5 columnas (días de la semana).

Entonces, en cada unidad temporal o bloque de tiempo. Se consideran como actividades:

- El profesor está impartiendo clases.
- El profesor esta fuera de turno.

Por tanto, cada elemento de la matriz h_{ij} es un número entero que denota la cantidad de actividades que el profesor realiza en la hora i y el día j.

$$H = T + \sum_{m \in M_p} H_m$$

en donde T es la matriz de turno del profesor, con 1s en las franjas de tiempo fuera de turno del profesor y 0s en el resto, y Hm son las matrices horario de las materias que el profesor tiene asignadas.

Idealmente, el horario del profesor solamente debe tener 0s (está libre en ese bloque de tiempo) o 1s (está ocupado haciendo una actividad o fuera de su turno).

La cantidad de choques de cada profesor se determina mediante el número de $h_{ij} \neq 1 \; o \; 0$.

Sin embargo, a la hora de determinar las penalizaciones de la función objetivo hay que considerar que hay diferentes tipos de choques y por tanto tienen distintas repercusiones en la calidad final de una asignación.

A demás de los choques hay que considerar otros aspectos, la carga horaria del profesor depende de:

- La dedicación del profesor
- La estabilidad del profesor
- La cantidad de materias distintas que tenga asignadas

Los profesores con dedicación Tiempo Completo tienen una carga nominal de 20 horas de clase. Si el profesor tiene labores adicionales como: cargos administrativos, proyectos de investigación, entre otros; se reduce su carga horaria apropiadamente.

A los profesores con carga horaria de 20 horas, que tengan asignadas 3 materias distintas se les reduce su carga en 5 horas. O equivalentemente, se considera que 5 horas de las 20 son empleadas en la preparación adicional de clases.

Los profesores con dedicación Tiempo Parcial con estabilidad tienen carga horaria variable, según el profesor, hasta un máximo de 15 horas de clase.

Los profesores con dedicación Tiempo Parcial sin estabilidad tienen carga horaria de cero. Esto es, se le asignan materias solamente en el caso en que asignárselas a otros profesores incurra en problemas más graves que este.

Para determinar este aspecto se define el delta carga, o dC, como la diferencia entre la carga horaria del profesor y el total de horas de clases que tiene asignadas actualmente.

$$dC = carga - hrsAsignadas$$

Debe favorecerse las asignaciones que se ajusten lo más posible a las cargas horarias de los profesores. Es decir, si un profesor tiene una carga de 20 horas, debe procurarse asignarle un conjunto de materias cuyo total de horas de clases se acerque lo más que se pueda a 20, pero sin pasarse. Es preferible quedarse cortos en 2 horas, que pasarse por 1. En este sentido, el signo de dC importa, la penalización fdC que se considera es:

si $dC \geqslant 0$ entonces $fdC = dC$

si $dC < 0$ entonces $fdc = -\mathrm{w}dC$

Donde w es un peso arbitrario mayor que uno.

Adicional a la carga horaria hay que considerar el turno del profesor esto es, el tiempo presencial en la universidad, preferiblemente no debe superar las 9 horas. Es importante entonces, asignarle materias al profesor que tengan este aspecto en consideración. Es decir, que la "distancia" entre la primera hora de clase y la ultima hora de clase del profesor, para cualquier día, sea menor o igual que 10 bloques de tiempo (10 bloques de tiempo equivalen a 8 horas y 20 minutos).

Si dividimos las 19 horas de clase del día en turnos,

- Mañana: las 6 primeras horas
- Mediodía: la hora 7 (se considera dentro de Tarde)
- Tarde: de la hora 8 a la 13
- Noche: de la hora 14 a la 19

Adicionalmente es deseable que la distancia entre los bloques de tiempo de sus materias en un día no supere las 6 horas, así como asignaciones consecutivas. Estas últimas restricciones, aunque no caracterizan una solución no factible si permite diferenciar entre soluciones igualmente factibles cuyo valor ahora ya no será 0.

III Tabú Search

Una vez que se determina una función objetivo, que considere todos los aspectos descritos previamente se construye una primera solución mediante un modelo GRASP [2]. Primero se obtiene una lista ordenada de profesores según su Categoría, Dedicación y Antigüedad.

Luego, para cada materia, se asigna entre los n primeros profesores en la lista que no incurran en ninguna penalización (en este estudio se tomó n= 3). Si agotamos la lista de profesores y no encontramos ninguno que conlleve una penalización, le asignamos entre los profesores con la menor cantidad de penalizaciones. Continuamos de esta manera hasta agotar todas las materias.

Con esta solución inicial, que no es factible, se procede a realizar un Tabu Search [7].

Para poder mejorar la solución se define un Local Search a través de un movimiento base, mediante el intercambio de dos materias entre dos profesores, que permita reducir su valor de la función objetivo [8]. Sin embargo, aplicando iterativamente este procedimiento eventualmente se alcanza un mínimo local del cual no se puede escapar.

Así el Tabú Search guarda los movimientos que se han hecho recientemente que nos permita determinar qué movimiento elegir en situaciones en donde no hay una opción evidente.

Para determinar esa lista se considera un movimiento base:

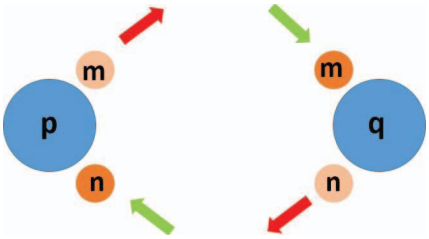


Figura 2: movimiento base.

- p suelta m
- q suelta n
- p toma n
- q toma m

Para evitar los movimientos opuestos a movimientos previamente realizados, que nos devuelvan a una solución anterior. Entonces, basta con guardar únicamente las componentes:

- p suelta m
- q suelta n

Y que para un potencial nuevo movimiento, este no contenga profesores que tomen materias que recientemente han soltado, evitando así los ciclos.

Así la lista Tabú estará formada por una matriz de dimensión PxM. Donde P es el número de profesores y M el número de materias. De forma que si p,q y m,n son los índices que denotan a dos profesores y dos materias, respectivamente, entonces después de realizar este movimiento se guarda en Tabú(p,m) el número de iteración actual.

Para determinar si, dado un potencial movimiento, se ejecuta o no, hay que verificar si está en la lista Tabú, es decir si los componentes del movimiento por realizar han ingresado recientemente en Tabú. Esto es,

$$i - \text{Tabú(p,m)} < k$$

donde k es la cantidad de iteraciones que se mantiene desactivados los movimientos que involucren estas componentes.

Una manera de acotar conservadoramente el tamaño de la lista Tabú k es:

$$\text{k} = \binom{p}{2} = \frac{71*70}{2} = 2485$$

Para hacer una búsqueda efectiva, es esencial elegir un valor adecuado de k. Mientras mayor sea k, más restrictiva se vuelves la búsqueda. Mientras menor sea k, más libre.

Una búsqueda demasiado restrictiva es contraproducente ya que después de una cantidad de iteraciones, se espera que la solución haya cambiado lo suficiente como para permitir el movimiento opuesto a uno previamente hecho. En caso contrario se bloquean los movimientos que potencialmente conduzcan a buenas regiones con asignaciones de alta calidad.

Una búsqueda demasiado libre, no saca de las regiones de mínimos locales.

IV Aproximación numérica

Una vez construido un algoritmo Tabú Search, usando una función objetivo que considere las restricciones, el movimiento base y la lista Tabú indicadas se realizaron diversos estudios de bloques de 5 búsquedas o repeticiones distintas mostrando en la Tabla 1 un grupo de ellas, ya que todas tienen el mismo comportamiento.

Cada una de las búsquedas se fijó el número máximo de iteraciones de 5000 y tomaron como promedio 60 segundos en completarse, con un procesador Intel Core i5 (2x 2.5GHz) y 8GB DDR4 de memoria RAM, logrando el objetivo de llegar siempre a soluciones factibles que presentar al coordinador de carrera en un breve tiempo.

Tabu Search		
Búsqueda	***Mejor Valor***	***Iteración***
1	110	864
2	109	895
3	111	3633
4	115	735
5	110	1491

Tabla 1: Resultados obtenidos

Si se grafica el valor de la solución objetivo, figura 3, que se va alcanzando en cada iteración por cada una de las soluciones.

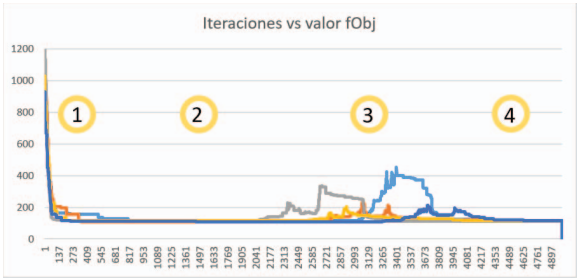


Figura 3: Gráfica de 5 búsquedas distintas.

Distinguimos 4 fases en cada búsqueda, una primera donde el algoritmo encuentra fácilmente movimientos que mejoran significativamente la solución, produciéndose un descenso rápido del valor de la función objetivo.

En la fase 2 la búsqueda llega a un óptimo local para el cual no hay movimientos que mejoren la solución. Aquí el recorrido entra en un "valle" en donde los movimientos que se toman no cambian el valor de la función objetivo.

Al irse acumulando los movimientos registrados en la lista Tabú, eventualmente se agotan los movimientos que no desmejoran la solución. En la fase 3, se fuerza a la búsqueda

a tomar caminos que “destruyen” el progreso logrado en la fase 1.

En la fase 4, cuando los movimientos destructivos modifican lo suficiente la configuración combinatoria de la solución, se crean nuevos movimientos posibles que antes no existían y de esta manera la búsqueda puede volver a mejorar la solución hasta finalmente llegar a otro optimo local. En el caso de incrementar el número máximo de iteraciones repetiríamos estas dos etapas, pero es mejor emplear el tiempo en realizar una nueva búsqueda Tabú.

V Conclusiones

Queda pendiente analizar un conjunto de soluciones equivalentes e identificar nuevos aspectos hasta el momento pasados por alto e incorporárselos a la función objetivo. Esto hace que soluciones antes indistinguibles (equivalentes) bajo la lupa de la función objetivo ahora puedan diferenciarse, reduciendo así el número de soluciones equivalentes del óptimo local y mejorando el comportamiento del algoritmo y presentando mejores soluciones al coordinador. Sin embargo, es importante mencionar que esto aumenta los tiempos de cómputo en la evaluación de los movimientos posibles en cada iteración.

Igualmente se pueden introducir nuevas metas de forma que se aborde un problema multiobjetivo o simplemente comparar el comportamiento de este algoritmo frente a otros métodos metaheurísticos como un algoritmo genético basado en poblaciones en lugar de trayectorias.

Referencias

[1] Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial optimization:algorithms and complexity*. Courier Corporation.

[2] Lewis, R. (2008). A survey of metaheuristic-based techniques for university timetabling problems. OR spectrum, 30(1), 167-190

[3] WERRA , An introduction to timetabling. European Journal of Operational Research 19 (1985), pp. 151-162.

[4] FISHER, J. G., SHIER, D. R., A heuristic procedure for large-scale examination scheduling problems. Technical Report 417, Department of Mathematical Sciences, Clemson University, 1983.

[5] WHITE, G. M., "Constrained satisfaction, not so constrained satisfaction and the timetabling problem". In: *A Plenary Talk in the Proceedings of the 3rd International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*, University of Applied Sciences, Konstanz, Aug., 16-18, 2000 (2000), pp. 32-47.

[6] BORKE, E. K., NEWALL, J. P., WEARE, R.F., 1996b. A memetic algorithm for University exam timetabling. In: Burke and Ross (1996) pp. 241-250.

[7] Knox, J. (1994). Tabu search performance on the symmetric traveling salesmanproblem. *Computers & Operations Research*, *21*(8), 867-876.

[8] Feo, T. A., & Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive searchprocedures. *Journal of global optimization*, *6*(2), 109-133.

[9] Glover, F., & Laguna, M. (1998). Tabu search. In *Handbook of combinatorialoptimization* (pp. 2093-2229). Springer, Boston, MA.

Study and description of the Soap Stone of Pajonal

Estudio y descripción de la Piedra Jabón de Pajonal

Hillary Sandoval
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
hillary.sandoval@utp.ac.pa

Tisla Destro
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
tisla.destro@utp.ac.pa

Rita Rodríguez
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
rita.rodriguez1@utp.ac.pa

Ernesto Martínez
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ernesto.martinez@utp.ac.pa

Eric Gutiérrez
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
eric.gutierrez@utp.ac.pa

Yinela Solis
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
yinela.solis@utp.ac.pa

***Abstract*—In the province of Coclé, Republic of Panama, there is a place known as The Membrillo Mine, where a colorful rock called Piedra Jabón is extracted, it is used by families since 1950 to make handicrafts. Since there were no studies related to this material, it was proposed to search for the mineralogical composition and the origin of this stone material. For this purpose, a sampling grid was develop in an established perimeter that included the areas where the so-called "Piedra Jabón" outcrops, rock samples were collected in order to perform macroscopic, microscopic, chemical and water chemical analyses. Geological literature points out that the rock called Piedra Jabón is a metamorphic rock, largely composed of talc ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$). Mineralogical analyses determined the presence of minerals of the kaolinite group and total absence of talc, presenting a high percentage of secondary minerals. Two hypothermal wells were located with high concentration of heavy metals that support hydrothermal activity. It is concluded that the Piedra Jabón de Pajonal was formed from deposits of volcanic agglomerates and breccias, subjected to the action of hydrothermal waters 150°-250°C (Intermediate argillic alteration); it is carvable due to its kaolinite content and its colors reflect the content of oxide minerals, the alteration has an age greater than 50000 years. Thus proving the difference of origin and mineralogy of the petrographically recognized rock as Piedra Jabón and the rock named in this research as Piedra Jabón de Pajonal.**

Keywords*— *hydrothermal alteration, metallogeny, mineralogy, petrology

***Resumen*—En la provincia de Coclé, república de Panamá existe la localidad conocida como la Mina de Membrillo, donde se extrae una vistosa roca que han llamado Piedra Jabón, utilizada por las familias desde 1950 para producir artesanías. No existiendo estudios relacionados a este material se propuso buscar la composición mineralógica y su origen. Para tal efecto se elaboró una malla de muestreo en un perímetro establecido que incluyó las áreas donde aflora la llamada "Piedra Jabón", se recolectaron muestras de rocas con el fin de realizar análisis macroscópicos, microscópicos, químicos y análisis químico de las aguas. La literatura geológica señala que la roca denominada Piedra Jabón es una roca metamórfica, compuesto en gran parte por talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$). Los análisis mineralógicos realizados determinaron la presencia de minerales del grupo de la caolinita y ausencia total de talco, presentando un alto porcentaje de minerales secundarios. Se localizaron dos pozos hipotermales con alta concentración de metales pesados que sustentan la actividad hidrotermal. Se concluye que la Piedra Jabón de Pajonal se formó a partir de los depósitos de aglomerados y brechas volcánicas del Volcán El Valle, sometidas a la acción de las aguas hidrotermales 150°-250°C (Alteración argílica intermedia); tallable por su contenido de caolinita y sus colores reflejan el contenido de minerales óxidos, la alteración tiene una edad superior a 50000 años. Comprobando así la diferencia de origen y mineralogía de la roca petrográficamente reconocida como Piedra Jabón y la roca nombrada en esta investigación como Piedra Jabón de Pajonal.**

Palabras claves*—*alteración hidrotermal, metalogenia, mineralogía, petrología

I. Introducción

En la provincia de Coclé, república de Panamá existe la localidad conocida como la Mina de Membrillo "Fig. 1", donde se encuentra una mina artesanal, donde se extrae una vistosa roca que han llamado "Piedra Jabón"; este lugar está operativo desde 1950 [1] y las familias la utilizan para producir artículos artesanales "Fig. 2"; en la actualidad existen artesanos en tres comunidades del corregimiento de Pajonal que son: La Mina, Membrillo Centro y Águila Abajo [2], quienes cuentan con permiso de extracción como artesanos, otorgado por el Ministerio de Ambiente de Penonomé.

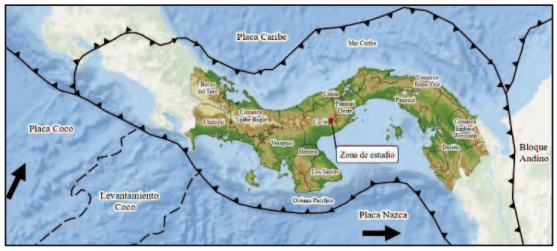


Fig. 1. Ubicación general de la zona estudiada.

Fig. 2. Estatuillas realizado en Piedra Jabón de Pajonal por artesanos de la comunidad de La Mina en Membrillo.

Las causas por las cuales se forman las rocas son muy variadas lo que obliga a la literatura geológica a señalar nomenclaturas petrográficas en base, entre otros, a

Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT).
.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00120

asociaciones mineralógicas que son indicativas de las condiciones fisicoquímicas existentes en el ambiente de formación. La roca denominada Piedra jabón es señalada como una roca metamórfica, compuesto en gran parte por mineral de talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) [3]. La presencia de estos filosilicatos (filitas) los relaciona con las características físicas de suavidad al tacto y la facilidad que tiene esta roca para ser trabajada, lo que ha favorecido su utilización desde tiempos antiguos por los egipcios, en África, en Brasil y Asia entre otros, para la confección de artesanías. Este tipo de roca es aislante y es muy utilizado en la fabricación de ollas, esculturas y decoración [4].

El área central del Istmo de Panamá, específicamente al norte de Penonomé, en la comunidad de Membrillo, existe una roca llamada empíricamente "Piedra Jabón", utilizada por los moradores para confeccionar artesanías, sin embargo, no se ha ubicado literatura ni investigación científica que hagan referencia a su origen o su composición mineralógica. Actualmente en la zona geográfica donde aflora esta roca existen estudios geológicos a gran escala realizados con interés de minería metálica y no metálica (arenas continentales). De los mapas geológicos existentes (mapa geológico de Panamá escala 1: 250000, mapa de las arenas continentales escala 1:100000) y de otros estudios, que presentan evidencias de periodos de impacto tectónico y volcánicos, se infiere información relacionada con la estratigrafía que señala la existencia como base de la región la Formación Tucué con presencia de dacitas y riodacitas entre las rocas que predominan [5], al sur de esta formación se encuentra la Formación El Encanto. Las rocas volcánicas formadas como ignimbritas son extensas, pero también se presentan como lavas y subintrusivos, además, esta formación es la base de la Formación El Valle, esta última esta constituida principalmente por tobas, en ocasiones bien estratificadas, que inició su existencia durante el Mioceno Superior y fue activo hasta el Cuaternario. Además, se pueden encontrar flujos piroclásticos y volcanoclásticos finos. El área de la investigación forma parte del complejo volcánico de El Valle [5].

La complejidad de este estudio consiste en revelar el origen y composición mineralógica de la roca llamada "Piedra Jabón de Pajonal", la relación existente con fenómenos tectónicos, las probables relaciones con volcanismo del cenozoico de modo especial con el Complejo Volcánico El Valle y con un marcado hidrotermalismo que se observa en el área.

II. Contexto Geológico

La zona de investigación está ubicada sobre el Bloque Chorotega [6], específicamente en la Región Central de Panamá y está dentro del Complejo Volcánico El Valle, siendo esta la estructura volcánica más grande y que domina prácticamente en toda la región. Esta estructura es más o menos circular con un diámetro de 60 kilómetros [5], los cuales abarca los distritos de Penonomé, Capira, Chame, San Carlos, Antón y parte de La Pintada y La Chorrera.

Este gran complejo es considerado el responsable de varias subsidencias y colapsos de diferentes magnitudes y con diferentes productos volcánicos, compuesto a su vez por calderas menores localizas a lo largos de las zonas de fracturas [2].

El elemento característico de la geología del área es la presencia de un edificio volcánico cuaternario en el Valle de Antón, a una distancia aproximada de 11 kilómetros al este de la zona estudiada (Pajonal). El Valle de Antón se considera un volcán extinto en la actualidad, pero su actividad volcánica fue muy explosiva y se mantuvo en actividad entre 1.5 y 2 millones de años [7].

Estructuralmente la región ha sido afectada por sistemas de fallas con diferentes orientaciones predominando los sistemas con la de orientación NE-SW pertenecen a la familia de fallas "Zona de falla de Coclé" y E-W pertenecientes a la familia de fallas "Cuenca Cerro Turega-Sorá"; Las evidencias de estas fallas se observan en la dirección de los ríos: río Zaratí, río Tranquilla, río Chorrerita, río Marica y el río Antón con orientación NE-SW y la de los ríos: río Sofrito, río Sañon, río Salado, río Serén y río Membrillo orientados E-W [2].

La estratigrafía inicia desde el Mioceno con formación Tucué, seguido por depósitos igninbriticos de la formación El Encanto (Plioceno); sobre esta se encuentran lavas pre-calderas y la fase eruptiva de brechas y aglomerados de formación El Valle (1.2 millones de años) y por último las erupciones Rio Mar (50000 años) y Mata Ahogado (34600) de la formación Rio Hato [2].

Como se describe estratigráfica se pueden encontrar formaciones geológicas desde el periodo Neógeno hasta el Cuaternario como se observa en la tabla I.

TABLE I. Formaciones Geológicas De La Región

Periodo	Época (Ma)	Grupo	Formación	Tipo de rocas
Cuaternario	Holeoceno (0,01-Actualidad)	Aguadulce	Rio Hato	Sedimentaria y Ígnea volcánicas
	Pleistoceno (2,6-0,01)	----------	El Valle	Ígnea volcánicas
Neógeno	Plioceno (5.3-2,6)	----------	El Valle	Ígnea volcánicas
	Mioceno (23-5,3)	La Yeguada	El Encanto	Ígnea volcánicas
		Cañazas	Tucué	Ígnea volcánicas

III. Metodología

A. Rasgos Geológicos

Para analizar los rasgos geológicos dominantes en la región estudiada se utilizaron bibliografías de referencia existentes, análisis de mapas a mayor escala y el uso de ArcGIS Pro para elaborar los mapas bases. Las labores características de estudios geológicos de campo se realizan con apoyo de martillos (para rocas ígneas y para rocas sedimentarias) apoyándose en una lente de 10X. Con estas observaciones se realizan los análisis macroscópicos de 36 muestras de rocas, observaciones panorámicas del sitio, característica de los afloramientos superficiales, identificación de fallas y otras estructuras de tipo tectónico, volcánicos o geomorfológicos. Se utiliza como herramienta para verificar el buzamiento y rumbo de los afloramientos la brújula geológica y para ubicación del sitio el GPS.

B. Pruebas Realizadas

Para verificar la composición mineralógica de la Piedra Jabón de Pajonal y su origen geológico se realizaron los siguientes estudios:

- Análisis microscópico: diez muestras de roca de la zona de estudio, incluyendo una muestra de Piedra

Jabón de Pajonal se enviaron para realizar cortes en sección delgada, tamaño de diapositiva 27x46 mm en el Laboratorio National Petrographic Service, Rosenberg, Texas; para ser analizado mediante el uso de microscopio de luz polarizada en el Laboratorio de Geología de la Universidad Tecnológica de Panamá.

- Difracción de rayos X: 10 muestras de rocas se les realizó Difracción de Rayos X cuantitativo en roca en el Laboratorio ACTLABS, Ontario, Canadá, de las cuales seis muestras corresponden a Piedra Jabón de Pajonal y cuatro muestras de rocas de contacto. Una muestra adicional de Piedra Jabón de Pajonal fue enviada para Difracción de Rayos X en arcilla semicuantitativo en el laboratorio de la Universidad de Cardiff, Reino Unido con el apoyo del Dr. David Buchs.
- Análisis de aguas: en sitio se comprobaron los parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad, sólidos totales disueltos y Ph a 36 puntos de muestreo; de los cuales 15 muestras se enviaron a el Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (Labaica, Panamá) y 10 muestras para análisis geoquímico para la detección de metales pesados (superficiales y subterráneas) en el Laboratorio de ACTLABS, Ontario, Canadá.

En base a los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio se realizó un postproceso en la etapa de análisis de los resultados mediante al cual se comparó los resultados obtenidos en cantidades, porcentajes y tipos de minerales presentes en las rocas versus la facilidad de tallado de la roca, así como textura, color entre otros parámetros para obtener las características petrográficas de la Piedra Jabón de Pajonal. En cuanto a los análisis de las aguas se identifica el tipo de agua hidrotermal presente, si la misma afecta a la calidad de las aguas superficiales y corroborar la existencia de sistemas de alteración hidrotermal en la zona.

IV. Resultados Y Discución

Esta investigación se centra en identificar las características principales y el comportamiento mineralógico del yacimiento no metálico de Piedra Jabón de Pajonal.

A. Metalogenia

En las profundidades del antiguo volcán El Valle de Antón, la fuente de calor puede ser una intrusión magmática dacítica de muy alta temperatura (>600°C), alcanzado profundidades relativamente poco profundas (5-10 km). Los fluidos cargados con vapor de agua y minerales disueltos por condiciones de presión y temperatura migran hacia las rocas de alrededor, conocidas como roca de caja; esta migración puede ser lateral o vertical y en ocasiones aflora en la superficie en forma de manantiales termales (como lo demuestran los resultados en las muestras W5 y W9P). Cabe señalar que a medida que el fluido se aleja de la cámara magmática su temperatura decrece, esto afectará al tipo de depósito hidrotermal que se origine, en el caso de las mineralizaciones de tipo argílica intermedia se dan en una temperatura entre los 150°C a 300°C.

En base al tipo de roca encontrado en campo, el comportamiento de los pozos hipotermales y los minerales secundarios que conforman La Piedra Jabón de Pajonal, esta se formó a partir de los depósitos de aglomerados y brechas volcánicas de la formación el Valle; estas rocas al entrar en contacto con las aguas subterráneas con temperaturas menores a 300°C cargadas de elementos diferentes se mezclaron con las aguas meteóricas que penetran el subsuelo por las fallas, provocando reacciones químicas que transforman los minerales de las rocas (alteración hidrotermal argílica intermedia) “Fig.3” y originaron una nueva roca nombrada en esta investigación Piedra Jabón de Pajonal.

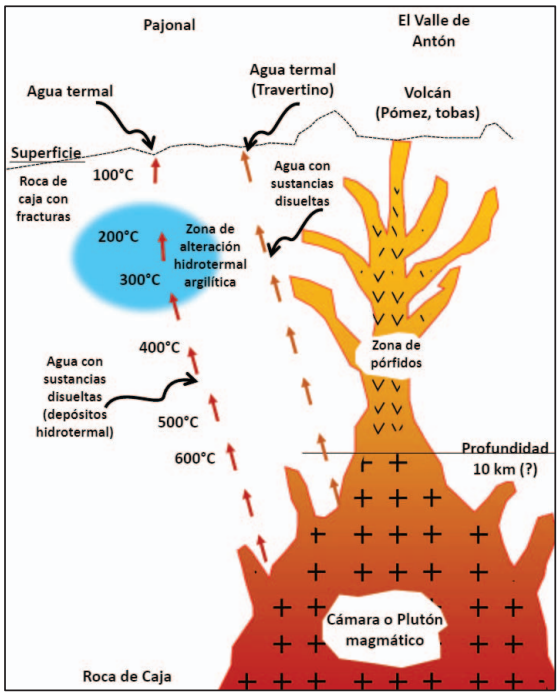


Fig. 3. Esquema del sistema hidrotermal que origina la Piedra Jabón de Pajonal, basado en el modelo esquemático del origen de mineralizaciones magmáticas e hidrotermales del documento (Sánchez, 2020).

B. Característica Macroscópica de la Piedra Jabón de Pajonal

La Mina de Membrillo se encuentra sobre el río Salado con coordenadas; 17 P 586581 950214; 327 m.s.n.m. El yacimiento ubicado en la mina presenta un contacto directo con una intrusión de roca fusa a alta temperatura procedente del subsuelo (dique dacítico).

De manera petrológica, la Piedra Jabón de Pajonal es una roca de origen ígneo, alterada por flujos hidrotermales en la fase argílica intermedia, presenta estructura clástica relicta, formada por fragmentos soldados entre sí, es de diversos colores entre naranjas, marrón, rojo, lila y gris, algunas muestras presentan patinas negras en la superficie de contacto y las vetas presentes en las rocas son rellenadas con minerales de hierro. Presenta una dureza 2 con un grado de meteorización desintegrado “Fig. 4”.

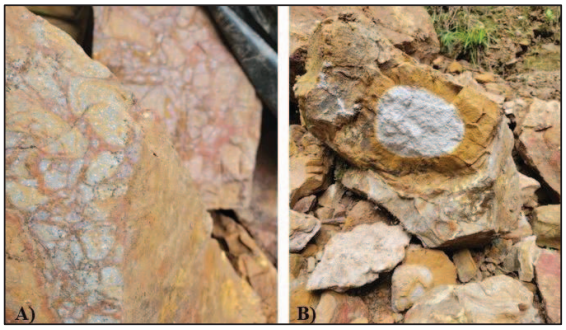


Fig. 4. Muestras de Piedra Jabón de Pajonal: A) Piedra Jabón de Pajonal con una estructura relicta de una brecha volcánica, B) Piedra Jabón de Pajonal con una estructura relicta de un aglomerado.

C. Descripción Microscópica

El corte delgado realizado en Piedra Jabón de Pajonal mostro que la muestra analizada presenta una estructura clástica original, formada por fragmentos de distintas rocas, minerales remplazados por materiales arcillosos (amorfos). Se observa hematita diseminada y contiene un mínimo de hidróxidos de hierro (magnetita) "Fig. 5". Estructura relicta con fragmentos alterados en minerales arcillosos, la roca madre es una brecha volcánica. La composición de la muestra está formada por minerales arcillosos (95%), hematita (4%), magnetita (1%).

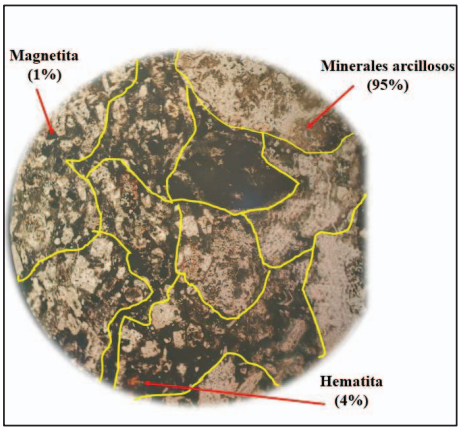


Fig. 5. Lámina delgada de una muestra de Piedra Jabón de Pajonal. Sección observada sobre un microscopio en POL 4x/01, vista en nicoles paralelos.

D. Difracción de Rayos X

Basados en los distintos resultados obtenidos a partir de la Difracción de Rayos X cuantitativa en la roca, se obtuvo que la Piedra Jabón de Pajonal utilizada para realizar artesanías, está compuesta en un rango por los siguientes minerales: cuarzo (0.7-0.9%) representativo de un mineral primario. Se detectaron amorfos y poco cristalino (36-46%), kaolinita (33-58%), cristobalita (1-17%) y los minerales óxidos como maghemita, anatasa y hematita que varían de 0.4-5%; en conjunto representan el 99% de minerales secundarios. El alto porcentaje de minerales secundarios indica que la roca ha sido alterada por fluidos hidrotermales.

A través de un análisis comparativo entre los resultados mineralógicos de las muestras de Piedra Jabón de Pajonal se ha logrado descartar aquellas muestras que a través de la descripción macroscópica presentan una similitud a la roca de estudio, en efecto, de las seis muestras enviadas caracterizadas como Piedra Jabón de Pajonal solo cuatro son mineralógicamente aceptables "Fig. 6". Las rocas de contacto analizadas muestran un comportamiento típico de una roca sana con leve alteración "Fig. 7", representando fenómenos y cambios volcánicos entre formaciones geológicas.

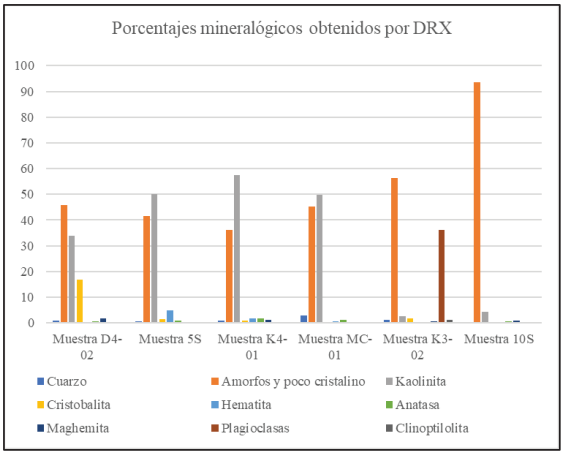


Fig. 6. Comparación mineralógica de las muestras determinadas macroscópicamente como Piedra Jabón de Pajonal.

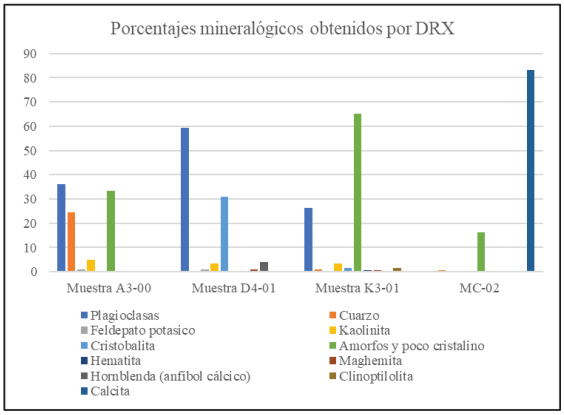


Fig. 7. Comparación mineralógicos de las muestras de contacto a la Piedra Jabón de Pajonal.

La codificación y descripción de las muestras analizadas se muestran en la tabla II.

TABLA II. MUESTRAS ANALIZADAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Código	Descripción macroscópica	Descripción microscópica
D4-02	Piedra Jabón de Pajonal	Piedra Jabón de Pajonal
5S	Piedra Jabón de Pajonal	Piedra Jabón de Pajonal
K4-01	Piedra Jabón de Pajonal	Piedra Jabón de Pajonal
MC-01	Piedra Jabón de Pajonal	Piedra Jabón de Pajonal
K3-02	Piedra Jabón de Pajonal	Brecha volcánica alterada
10S	Piedra Jabón de Pajonal	Toba meteorizada
A3-00	Roca sedimentaria	Limolita
D4-01	Dacita	Dacita
K3-01	Roca ígnea alterada	Brecha volcánica alterada
MC-02	Roca sedimentaria	Travertino

Los análisis de Difracción de Rayos X en arcilla fueron realizados en muestras de dos colores de la roca Piedra Jabón de Pajonal que se utiliza para el tallado; el área marrón resultó estar compuesta por cristobalita (45%), caolinita/dickita (30%), cuarzo (19%) y hematita (6%) “Fig. 8” y el área gris por cristobalita (40%), caolinita/dickita (33%), cuarzo (24%) y hematita (3%) “Fig. 9”.

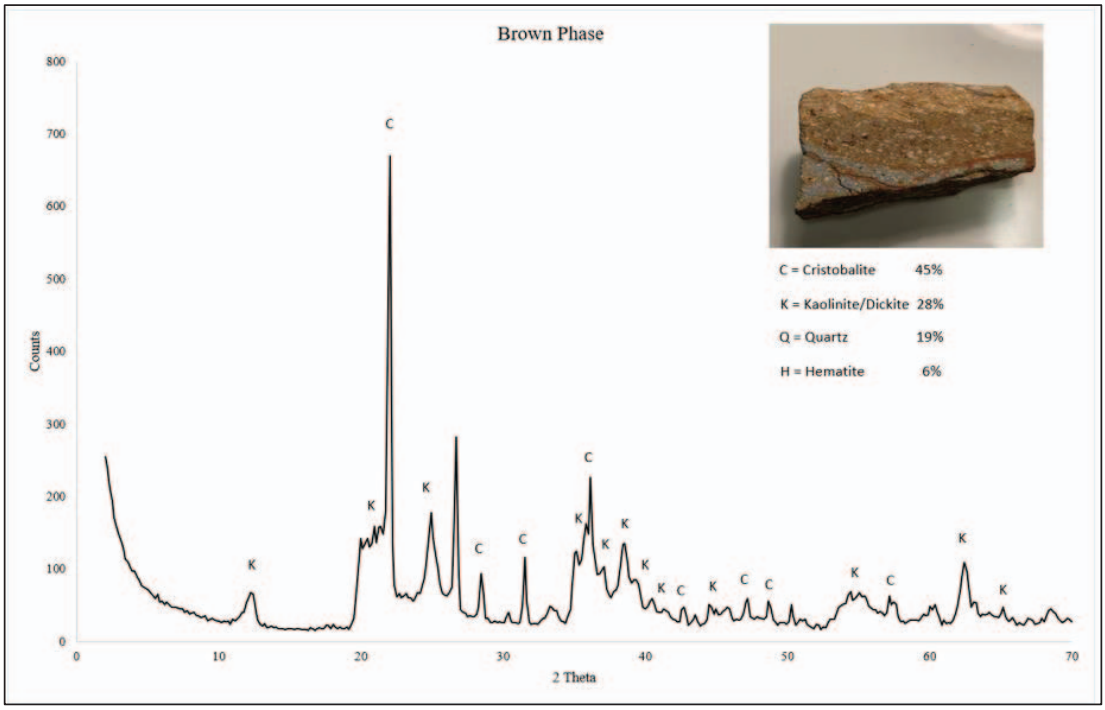


Fig. 8. Patrones de difracción en la muestra de Piedra jabón de Pajonal D4-00 de color marrón, ubicada en La Mina de Membrillo.

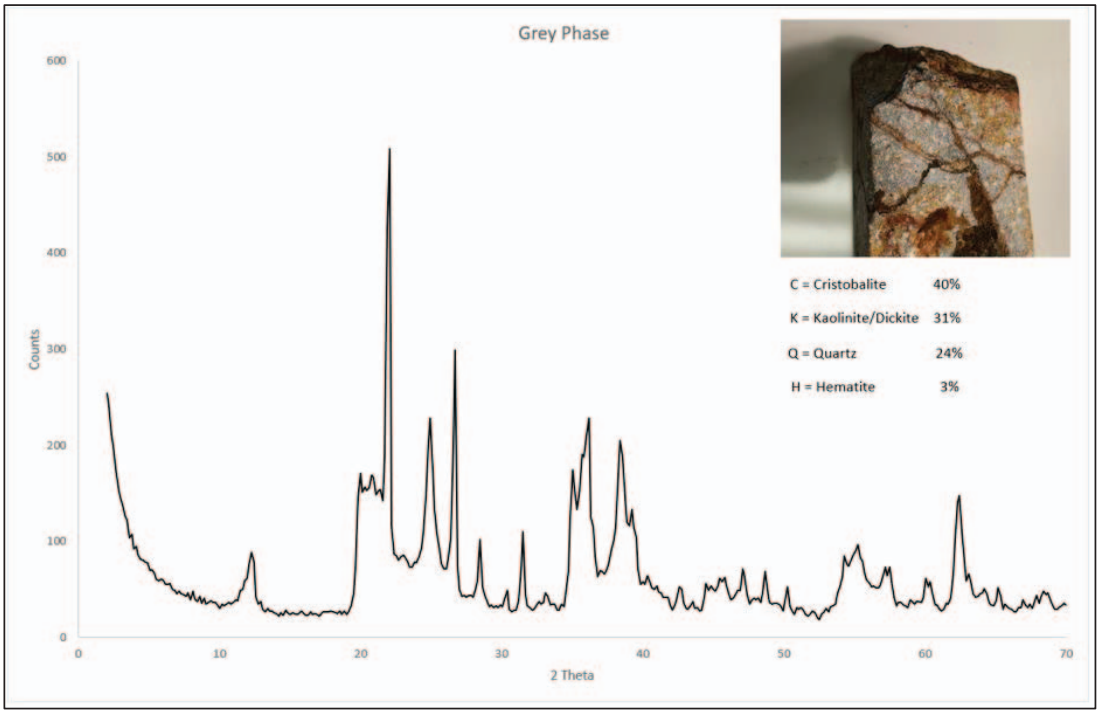


Fig. 9. Patrones de difracción en la muestra de Piedra jabón de Pajonal D4-00 de color gris, ubicada en La Mina de Membrillo.

Ninguno de los análisis realizados reportó presencia de talco. La sensación jabonosa que presenta esta roca la proporciona la caolinita y el material amorfo (arcillas). La ausencia de talco y presencia caolinita indican que el proceso de formación de los minerales no fue de tipo metamórfico y si de tipo hidrotermal. En la tabla III se realiza una comparación entre la Piedra jabón descrita en la literatura geológica y la Piedra Jabón de Pajonal.

TABLA III. MUESTRAS ANALIZADAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Nombre	Génesis	Composición mineralógica
Piedra Jabón	Metamórfico	Silicatos: talco, anfíboles. Filosilicatos: clorita Óxidos de hierro y cromo.
Piedra Jabón de Pajonal	Alteración hidrotermal argílico intermedio	Arcillas: Caolinita y minerales amorfos. Óxidos: Hematita, anatasa y maghemita.

E. Metales Pesados en las Aguas.

En base a los resultados obtenidos de los 36 elementos químicos analizados que se detallan a continuación: Aluminio (Al), Plata (Ag), Arsénico (As), Bario (Ba), Berilio (Be), Bismuto (Bi), Calcio (Ca), Cadmio (Cd), Cerio (Ce), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hiero (Fe), Potasio (K), Litio (Li), Magnetita (Mg), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Sodio (Na), Niquel (Ni), Fósforo (P), Plomo (Pb), Azufre (S), Antimonio (Sb), Selenio (Se), Silicio (Si), Estaño (Sn), Estroncio (Sr), Telurio (Te), Titanio (Ti), Talio (Tl), Uranio (U), Vanadio (V), Volframio (W), Itrio (Y), Cinc (Z), mediante al método ICP-OES en los dos pozos hipotermales (30 °C), de los puntos W5 y W9P, cuyo análisis indica que son aguas con alta concentración de: Aluminio (Al), Antimonio (Sb), Arsénico (As), Azufre (S), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Estroncio (Sr) Litio (Li), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Potasio (K), Silicio (Si), Sodio (Na); como se observa en la "Tabla. IV".

TABLA IV. CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ANALIZADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Simbología	W5	W9P
Elementos	mg/L	mg/L
Al	<0.1	0.3
Sb	< 0.010	< 0.010
As	0.07	0.03
S	78	57
Ba	0.05	0.08
Cd	<0.02	<0.02
Ca	0.0197	0.0252
Sr	0.0846	0.0666
Li	2.08	1.86
Mg	52.9	67.6
Mn	0.09	0.17
K	149	136
Si	51.3	46.3
Na	2040	2080

Los datos de metales pesadas representados en la tabla anterior nos revelan la comparación entre los dos pozos hipotermales analizados, mostrando una gran cercanía entre los valores por elementos, lo que nos indica que ambos flujos hipotermales vienen de una misma cámara magmática.

Debido al comportamiento de los metales pesados en los puntos de análisis de aguas y la temperatura que presentan ambos pozos, se logra identificar la existencia remante del mismo sistema hidrotermal que origina a la Piedra Jabón de Pajonal.

CONCLUSIONES

El análisis estratigráfico revela la existencia de afloramientos que incluyen cuatro formaciones (Tucué, El Encanto, El Valle y Río Hato) correspondiente cronológicamente a un amplio rango que inicia en el mioceno (de 23 M.a hasta hace 5.3 M.a) hasta el Holoceno (de hace 0.01 M.a. hasta hoy).

Las arcillas principalmente la caolinita, son los minerales (hidrotermales) que le dan a la Piedra Jabón de Pajonal la característica de suavidad al tacto que presenta cuando se trabaja y que, en la Piedra Jabón definida petrográficamente, la suministra la presencia del talco (mineral de metamorfismo).

La roca Piedra Jabón de Pajonal se formó a partir de los depósitos de aglomerados y brechas volcánicas de la formación el Valle que, luego fue alterada por fluidos hidrotermales con temperaturas menores a 300 °C transformando los minerales originales de las rocas dando origen a la nueva roca llamada "Piedra Jabón de Pajonal".

Las rocas de las erupciones de Mata Ahogado y Rio Mar de la formación Rio Hato no presentan alteración hidrotermal, por tanto, la alteración de la Piedra Jabón de Pajonal tiene una edad superior a 50000 años.

Se concluye que, si bien la Piedra Jabón de Membrillo se puede llamar "Piedra Jabón de Pajonal" por sus características y usos, esta no corresponde, ni por su composición mineralógica (no se presenta el talco) ni por su origen metamórfico, ya que la roca petrográficamente reconocida como Piedra Jabón de Pajonal se forma por alteración hidrotermal argílica intermedia.

RECOMENDACIONES

Para confirmar la geocronología de la Piedra Jabón de Pajonal se recomienda realizar datación a las rocas de contacto y a la misma.

Se recomienda realizar análisis de difracción de rayos X a la Piedra Jabón de Pajonal para verificar el comportamiento de las arcillas no identificadas.

Para confirmar el espesor del yacimiento de Piedra Jabón de Pajonal se recomienda realizar perforaciones en las zonas donde aflora este material.

Es importante señalar, en el caso de necesitarse utilizar pozos profundos para el suministro de agua para las comunidades, sería oportuno realizar estudios detallado del contenido de elementos no deseados, puesto que, la zona está afectada por procesos hidrotermales y presencia de elementos no aptos.

Referencias

[1] E. Valdez, «Dan vida a las piedras,» *díaadía,* 2013.

[2] H. Sandoval, «Elaboración del mapa geológico de un polígono establecido en los corregimientos de Pajonal y San Juan de Dios, en Coclé donde se ubica y clasifica el yacimientode la Piedra Jabón de Pajonal,» Panamá, 2022.

[3] J. D. Burga, «Diccionario geológico,» 2011.

[4] Instituto Geológico y Minero de España, «Especificaciones y Clasificación de las Rocas,» 1973.

[5] Swedish Geological International, «Geologia y ocurrencia de minerales en tres sectores de Panamá,» 1991.

[6] A. A. Gregorio Escalante, «Geología del este de Costa Rica y el norte de Panamá,» julio 2011.

[7] Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación, «Informe Final del Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Panamá,» julio 1987. [En línea]. Available: http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0168.pdf.

[8] P. S. Serrano, «Modelo hidrológico de la cuenca del Río Zaratí,» 2010. [En línea]. Available: http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/rdata/tespo/r_salmod000.pdf.

[9] A. E. Sánchez, «Apuntes de Yacimientos Magmático-Hidrotermales para el curso de Metalogenia de la Facultad de Ingeniería,» 2020. [En línea]. Available: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17342/Material%20did%C3%A1ctico.pdf?seq.

[10] D. M. Buchs, «Contribución volcánica al surgimiento de Panamá Central en el Mioceno temprano,» 2019. [En línea].

[11] D. M. Buchs, «Geología del Cretácico Tardío al Eoceno del Sur de América Central antearco (sur de Costa Rica y oeste de Panamá): Inicio y evolución de un,» 2008. [En línea]. Available: https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_DC78FD7DEA5A.P001/REF.

[12] A. Caballero, «Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá mediante métodos geofísicos,» 19 enero 2010. [En línea]. Available: https://www.tdx.cat/handle/10803/288042#page=1.

[13] A. &. C. L. &. A. M.-P. &. B. W. Coates, «La geología del Darién, Panamá, y la colisión entre el Mioceno tardío y el Plioceno del arco de Panamá con el noroeste de América del Sur,» *Sociedad Geológica de América,* noviembre 2004.

[14] D. I. ,. C. ,. M. ,. W. ,. C. ,. A. ,. David M. Buchs, «Contribución volcánica al surgimiento de Panamá Central en el Mioceno temprano,» vol. 9, nº 1417 (2019), 04 05 2019.

[15] A. O'Dea, «Formación del Istmo de Panamá: Respuesta a Jaramillo et al.,» abril 2018.

[16] E. M. Rita Rodriguez, «Diseño de un modelo para crear un geoparque en El Valle de Antón,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 2020].

[17] Registro Público de Panamá, «Cooperativa Artesano Unidos de Membrillo,» 2001.

[18] Notaría del circuito de Penonomé, «Cooperativa Artesanos Unidos de Membrillo,» 2001.

[19] Dirección general de recurso minerales , «Mapa geológico de Panamá,» 1990. [En línea].

[20] Walter Montero, «Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá,» *Geológica de América Central,* pp. 29-56, 2001.

[21] F. Barat, «Transición de la subducción de la placa de Farallón a la colisión entre América del Sur y Central: evolución geológica del istmo de Panamá,» 2014.

Modelling of the effective permittivity of anisotropic filament structures

Jesus Nain Camacho Hernandez
Institute for Pulsed Power and Microwave Technology (IHM)
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Karlsruhe, Germany
jesus.hernandez@kit.edu

Guido Link
Institute for Pulsed Power and Microwave Technology (IHM)
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Karlsruhe, Germany
guido.link@kit.edu

Abstract—Generating a rigorous, description of the effective permittivity of anisotropic media requires an appropriate consideration of its microstructural geometry and orientation. In this study, we use anisotropic geometrical models made of filaments along with electromagnetic wave propagation calculations to investigate the effect of filament orientation on the effective permittivity. As a result, we have identified a correlation tensor parameter that, in conjunction with the filament orientation tensor provides efficient and reliable estimates of the effective permittivity of filamentary structures with solid volume fractions below 10 %.

Keywords—effective permittivity, anisotropic media, filaments, effective media approximation.

I. INTRODUCTION

Describing the effective permittivity $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ of multiphase isotropic media is accomplished by using mixing relations based on the effective media approximation (known as EMA relations) or probability distribution relations based on means of the micromechanical bounds (e.g., Wiener and Hashin–Shtrikman bounds) [1]. The Hashin–Shtrikman bounds provide rigorous restrictions to the effective permittivity of isotropic media, while the Wiener bounds extend restrictions to anisotropic media.

Filaments can be constituted of either isotropic or anisotropic materials but anisotropy result from geometrical arrangements with to some degree of preferred orientation. Phenomenologically, EMA relations describe anisotropic microstructures considering their spatial orientation, however, are limited to microstructures consisting of spherical and quasi-spherical (e.g., ellipsoids) inclusions embedded in a continuous medium [2]. As microstructures made of filaments are not geometrically similar to ellipsoidal inclusions, EMA relations are not able to accurately estimate their effective permittivity (in particular their imaginary part). In the absence of reliable estimates using EMA relations, experimental measurements are usually applied. The measurement method must be capable of performing $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ determinations for anisotropic materials. Measurements involve determining the solid volume fraction δ_{s} and $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ for fitting data to probability distribution relations [1]. Nevertheless, the fitted relations do not consider other orientations of the inclusions than those acquired from the measured samples.

Recently, a Topological relation was presented for the estimation of $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ of isotropic media such as open-cell foams [3]. The relation reads as

$$\varepsilon_{\mathrm{eff}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)}(\varepsilon_{\mathrm{s}} - \varepsilon_{\mathrm{v}}) + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g\varepsilon_{\mathrm{v}}) \,, \tag{1}$$

where ε_{s} and ε_{v} are the permittivity of the solid (i.e., filaments) and voids, respectively, δ_{v} is the voids volume fraction, and g is a scalar complex-valued correlation parameter that contains the topological details of the microstructure and is dependent of the solid volume fraction $\delta_{\mathrm{s}} = 1 - \delta_{\mathrm{v}}$, voids volume fraction and permittivity contrast $\varepsilon_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{v}}{}^{-1}$, that is $g = f(\delta_{\mathrm{s}}, \delta_{\mathrm{v}}, \varepsilon_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{v}}{}^{-1})$. Moreover, as the topology is the result of the microstructural geometry and its orientation, g also contains information of both characteristics.

The filaments orientation can be described through an orientation tensor [4] as

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

where the components t_{ij} are the sum over the dyadic products of the directional unit vector d_{k}, (consisting of the cartesian components x_{k}, y_{k} and z_{k}) where d_{k} describes the direction of the k^{th} filament to the n number of filaments, that is

$$T = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} d_{\mathrm{k}}\, d_{\mathrm{k}}^{\mathrm{T}} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \begin{bmatrix} x_k x_k & x_k y_k & x_k z_k \\ y_k x_k & y_k y_k & y_k z_k \\ z_k x_k & z_k y_k & z_k z_k \end{bmatrix}. \tag{3}$$

In anisotropic materials the effective permittivity is described by a permittivity tensor [2,5] (also known as dielectric tensor) given as

$$\varepsilon_{\mathrm{eff}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\mathrm{eff,xx}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,xy}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,xz}} \\ \varepsilon_{\mathrm{eff,yx}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,yy}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,yz}} \\ \varepsilon_{\mathrm{eff,zx}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,zy}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,zz}} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Consequently, the topology in terms of g is also a tensor. As g may not only contain information of the orientation given by T but also for the micro-geometry, we propose an additional correlation tensor containing the geometry details of the microstructure, which is given as

$$K = \begin{bmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} & \kappa_{13} \\ \kappa_{21} & \kappa_{22} & \kappa_{23} \\ \kappa_{31} & \kappa_{32} & \kappa_{33} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

we refer to K as geometrical parameter. Consequently, for anisotropic filamentary media g is a function given as $g = f(\delta_{\mathrm{s}}, \delta_{\mathrm{v}}, \varepsilon_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{v}}{}^{-1}, T, K)$.

In this work, we study the reliability of a g-function which incorporates the geometrical and orientation tensors to estimate the effective permittivity of virtual anisotropic filamentary media in which the filaments are oriented to any spatial disposition.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Construction of filamentary structural models

Computational modelling begins with defining filaments orientations to the $\varepsilon_{\mathrm{eff,ji}}$ orientations. Note that, $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ has a

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00121

Hermitian symmetry such that $\varepsilon_{\mathrm{eff,ij}} = \varepsilon_{\mathrm{eff,ji}}$, therefore, $T_{\mathrm{ij}} = T_{\mathrm{ji}}$. Then we only need to consider filamentary structures oriented to the $\Lambda = \{xx,\ xy,\ xz,\ yy,\ yz,\ zz\}$ directions, as illustrated in Fig. 1.

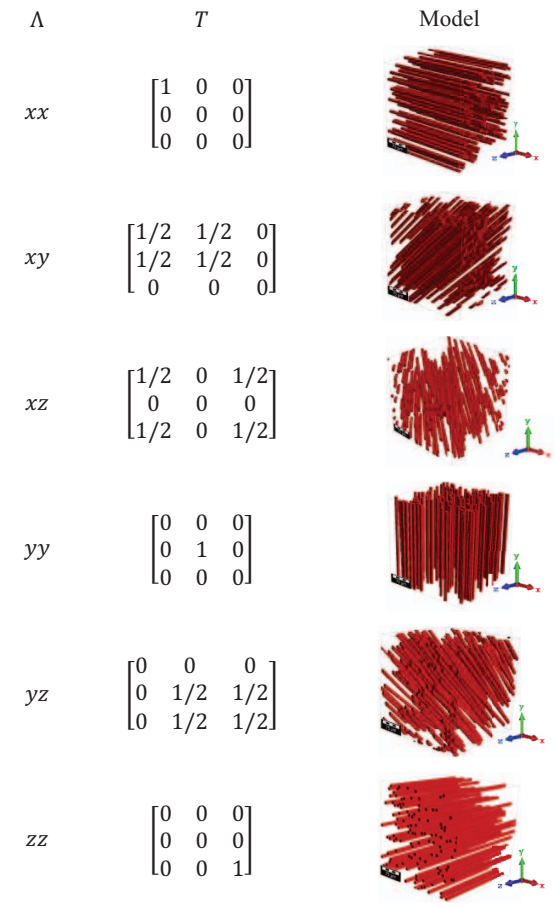


Fig. 1. Illustration of filaments directed to Λ-orientations.

T can be reoriented to either Λ directions by tensor rotation as

$$T_\Lambda = \begin{bmatrix} t_{\Lambda,11} & t_{\Lambda,12} & t_{\Lambda,13} \\ t_{\Lambda,21} & t_{\Lambda,22} & t_{\Lambda,23} \\ t_{\Lambda,31} & t_{\Lambda,32} & t_{\Lambda,33} \end{bmatrix} = [R_\Lambda][T][R_\Lambda]^{\mathrm{T}}, \quad (6)$$

where $T_\Lambda = \{T_{\mathrm{xx}}, T_{\mathrm{xy}}, T_{\mathrm{xz}}, T_{\mathrm{yy}}, T_{\mathrm{yz}}, T_{\mathrm{zz}}\}$ is the reoriented tensor T and R_Λ is a composite rotation matrix. R_Λ is composed of the rotation matrices $R_{\mathrm{x}}(\theta)$, $R_{\mathrm{y}}(\phi)$, and $R_{\mathrm{z}}(\varphi)$ given as

$$R_\Lambda = [R_{\mathrm{z}}][R_{\mathrm{y}}][R_{\mathrm{x}}], \quad (7)$$

$$R_{\mathrm{x}}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$R_{\mathrm{y}}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$R_{\mathrm{z}}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

The model re-orientation to the Λ-orientations is achieved by using the Euler's angles (θ, ϕ, φ) [6] summarized in Table 1. Note, we consider T_{xx} as the initial orientation tensor T.

TABLE I. ROTATIONAL EULER'S ANGLES (θ, Φ, φ) TO GENERATE T_Λ

Λ	Rotational angles (θ, Φ, φ) / °		
	θ	Φ	φ
xx	0	0	0
xy	0	0	45
xz	0	45	0
yy	0	0	90
yz	0	90	-45
zz	0	90	0

The multiscale modelling GeoDict software (from Math2market GmbH, Germany) was used to generate 3D virtual models of straight filaments by specifying their orientation tensor and by restricting overlapping of filaments. Once filamentary models are generated, their surface geometry is converted to smoothed meshes and are imported into CST Studio (from Dassault Systems, France) to calculate their dispersion parameters by performing electromagnetic wave propagation simulations. The simulation setup is shown in Fig. 2.

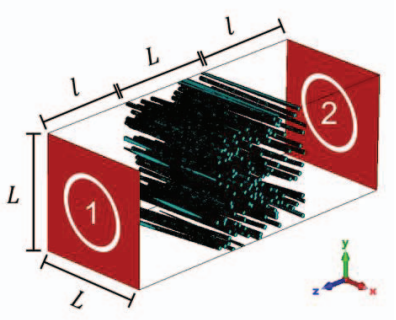


Fig. 2. Illustration of the setup for numerical simulations.

The boundary conditions are: normal electric- ($E_{\mathrm{tangential}} = 0$) walls for the x-axes boundaries and normal magnetic- ($H_{\mathrm{tangential}} = 0$) walls for the y-axes boundaries; z-axes boundaries (corresponding to wall 1 and 2) are non-reflective open boundaries with an added distance l to the models. Models consider a wave propagation to the z-axis direction, where the wave electric field is parallel to the x-axis ($E_{\mathrm{z}} = 0$ and $E_{\mathrm{y}} = 0$).

Models correspond to cubes of size L of a resolution given by the voxel length S, and containing filaments of diameter d_{f}. A parametric study was performed to ensure model size parameters- and grid-independent results, which resulted in

defining model parameters as $L = 30d_f$, $S = d_f/7$, $l = 25d_f$ (minimum representative volume cube) and producing meshes with a cell count greater than 2,000,000. Computational burden for model generation and computation time increases as δ_v decrease, hence, in this study we work with models having $\delta_v > 0.90$. Macroscopically, the permittivity of models can be considered as that of an effective medium possessing an effective permittivity, as the filaments are much smaller than the wavelength of the propagated electromagnetic wave. Calculations were performed using the frequency domain solver from CST studio, which uses the finite element method to solve the integral formulation of the Maxwell equations. Models were solved for the frequency range from 2.43 GHz to 2.47 GHz and were monitored at a frequency of 2.45 GHz to obtain their scattering parameters corresponding to the reflected S_{11} and transmitted S_{12} scattering signals. In the next step, ε_{eff} was calculated from the scattering parameters by using the retrieval method as described elsewhere [3,7]. The effective permeability μ_{eff} was also calculated using the retrieval method. However, models have no magnetic properties, thus, μ_{eff} was only used to validate whether calculations yield the permeability of a non-magnetic sample, i.e., $\mu_{\text{eff}} = 1.0 - j0.0 \pm (0.1 - j0.005)$.

Λ-oriented models (see Fig. 1) were produced to be randomly distributed to the Λ-directions with $\delta_v = 0.90$, $\varepsilon_s = 10 - j5.0$ (filament permittivity) and $\varepsilon_v = 1 - j0$ (air permittivity). For each orientation a different model was generated, so that filaments were different randomly distributed at each Λ-direction. After model generation and pre-processing for model simulation setup, the filamentary models achieved $\delta_v = 0.90 \pm 0.005$. The models were used to obtain $\varepsilon_{\text{eff},\Lambda}$ and then for the disclosure of a g-function that satisfies $g = f(\delta_s, \delta_v, \varepsilon_s\varepsilon_v^{-1}, T, K)$, which was afterwards used for obtaining K.

Estimations of ε_{eff} from relation (1) and from simulations were compared using three types of models: an axis-oriented model (models A), a random-oriented model (models B) and an xy biaxial-oriented model (model C). Models are illustrated in figure 3, and their topological and dielectric parameters are described in Table 2 and 3, respectively.

TABLE II. TOPOLOGICAL PARAMETERS OF TESTED MODELS

Model	T (-)	d_f (μm)	δ_v (-)
A	$\begin{bmatrix} 0.4893 & 0.0047 & 0.4995 \\ 0.0047 & 0.0002 & -0.0049 \\ 0.4995 & -0.0049 & 0.5105 \end{bmatrix}$	10	0.9013
B	$\begin{bmatrix} 0.2197 & -0.0097 & 0.0125 \\ -0.0097 & 0.6303 & -0.0062 \\ 0.0125 & -0.0062 & 0.1500 \end{bmatrix}$	20	0.9499
C	$\begin{bmatrix} 0.5191 & 0.0016 & -0.0060 \\ 0.0016 & 0.4792 & 0.0089 \\ -0.0060 & 0.0089 & 0.0017 \end{bmatrix}$	20	0.9312

TABLE III. DIELECTRIC PARAMETERS OF TESTED MODELS

Dielectric parameters	ε_s (-)	ε_v (-)
1	$10.0 - j5.0$	$1.0 - j0.0$
2	$20.0 - j7.0$	$1.0 - j0.0$
3	$7.0 - j5.5$	$2.5 - j1.2$

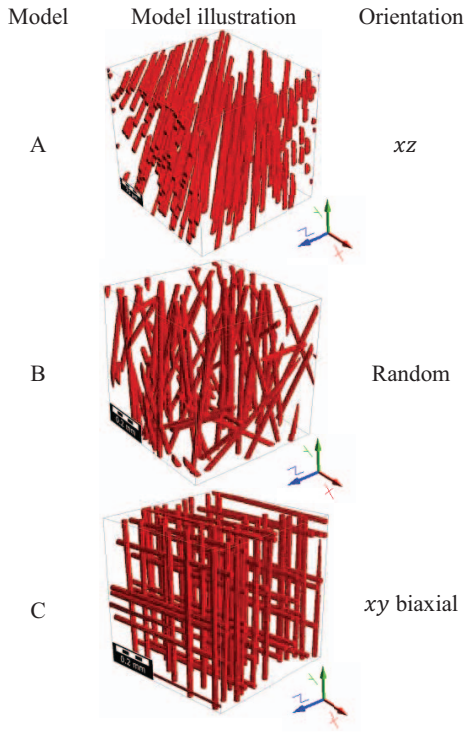


Fig. 3. Illustration of tested models.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 4 and 5 shows the real (effective dielectric constant) and imaginary (effective dielectric loss) parts of $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$, $\varepsilon_{\text{eff,yy}}$ and $\varepsilon_{\text{eff,zz}}$ with the electric field polarized in x-direction, as well as the top and bottom permittivity restrictions for anisotropic media given by the upper and lower Wiener bounds. $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ is in concordance to an arrangement of parallel inclusions reaching the upper Wiener limit, while, $\varepsilon_{\text{eff,yy}}$ and $\varepsilon_{\text{eff,zz}}$ are practically identical to each other and are closer to the lower Wiener limit, where inclusions are arranged in series.

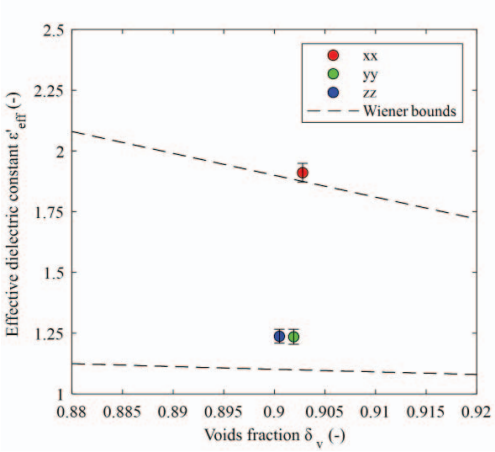


Fig. 4. Effective dielectric constant of filaments oriented to the x, y and z axis corresponding to $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$, $\varepsilon_{\text{eff,yy}}$ and $\varepsilon_{\text{eff,zz}}$, using models from Fig. 1 with $\varepsilon_s = 10 - j5.0$ and $\varepsilon_v = 1 - j0$.

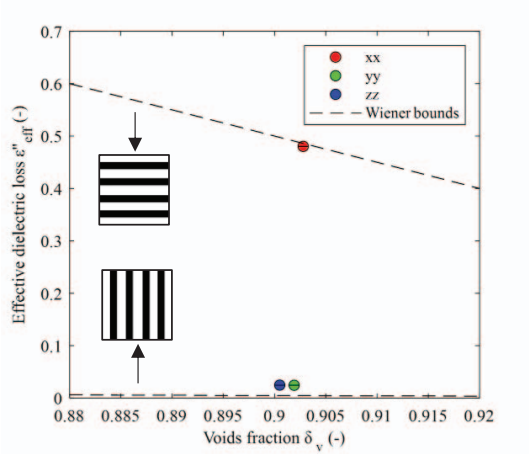


Fig. 5. Effective dielectric loss of filaments oriented to the x, y and z axis corresponding to $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$, $\varepsilon_{\text{eff,yy}}$ and $\varepsilon_{\text{eff,zz}}$, using models from Fig. 1 with $\varepsilon_{\text{s}} = 10 - j5.0$ and $\varepsilon_{\text{v}} = 1 - j0$. Insets illustrating series and parallel inclusions are indicated from the upper and lower Wiener bounds.

Results correctly agree with the direction of the electric field which is parallel to the x-axis, and normal to the y- and z-axes (see boundary conditions from Section 2). Given that the series and parallel arrangements are the limiting cases of the filament's spatial disposition, any other spatial configuration of the filaments is strictly bounded between $\varepsilon_{\text{eff,yy}}$ or $\varepsilon_{\text{eff,zz}}$ (corresponding to the lower permittivity), and $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ (corresponding to the upper permittivity).

Equation (1) was used to calculate g using the $\varepsilon_{\text{eff},\Lambda}$ elements of the dielectric tensor as

$$g = \frac{2\delta_{\text{v}}(\varepsilon_{\text{s}}-\varepsilon_{\text{v}})}{(1+\delta_{\text{v}}{}^2)\varepsilon_{\text{v}}} - \frac{\varepsilon_{\text{s}}}{\varepsilon_{\text{v}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{v}}}\begin{bmatrix} \varepsilon_{\text{eff,xx}} & \varepsilon_{\text{eff,xy}} & \varepsilon_{\text{eff,xz}} \\ \varepsilon_{\text{eff,yx}} & \varepsilon_{\text{eff,yy}} & \varepsilon_{\text{eff,yz}} \\ \varepsilon_{\text{eff,zx}} & \varepsilon_{\text{eff,zy}} & \varepsilon_{\text{eff,zz}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

consequently, g is given as

$$g = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

where the $g_\Lambda = \{g_{\text{xx}}, g_{\text{xy}}, g_{\text{xz}}, g_{\text{yx}}, g_{\text{yy}}, g_{\text{yz}}, g_{\text{zx}}, g_{\text{zy}}, g_{\text{zz}}\}$ values were found to consist of the multiplication of δ_{v}, δ_{s}, $\varepsilon_{\text{s}}, \varepsilon_{\text{v}}{}^{-1}$ and a pure geometrical factor G_Λ, that is

$$g_\Lambda = \delta_{\text{s}}\delta_{\text{v}}\varepsilon_{\text{s}}\varepsilon_{\text{v}}{}^{-1}G_\Lambda. \quad (13)$$

where G_Λ values are summarized in Table 4.

TABLE IV. G_Λ −VALUES FOR FILAMENTARY STRUCTURES

$\mathbf{G_\Lambda}$	Value	G_Λ	Value
g_{xx}	$1.000 - j0.029$	$g_{\text{xy}} = g_{\text{yx}}$	$0.491 + j0.040$
g_{yy}	$0.168 + j0.086$	$g_{\text{xz}} = g_{\text{zx}}$	$0.491 + j0.040$
g_{zz}	$0.168 + j0.086$	$g_{\text{yz}} = g_{\text{zy}}$	$0.168 + j0.086$

We propose a simple function which describes G_Λ consisting on the sum of contributions between $t_{\Lambda,\text{ij}}$ and κ_{ij}, which gives g_Λ as

$$G_\Lambda = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\left|t_{\Lambda,\text{ij}}\right|\kappa_{\text{ij}}. \quad (14)$$

The g_Λ function (13) allows K to be related to any T_Λ, and therefore satisfies $g = f(\delta_{\text{s}}, \delta_{\text{v}}, \varepsilon_{\text{s}}\varepsilon_{\text{v}}{}^{-1}, T, K)$. The value of K was obtained by Gaussian elimination from a system of linear equations applied to the Λ-orientations given by (14), the calculated values for κ_{ij} are summarized in Table 5.

TABLE V. κ_{ij}-VALUES FOR STRAIGHT FILAMENTARY STRUCTURES

$\boldsymbol{\kappa_{\text{ij}}}$	Value	$\boldsymbol{\kappa_{ij}}$	Value
κ_{11}	$1.000 - j0.038$	$\kappa_{12} = \kappa_{21}$	$-0.085 + j0.017$
κ_{22}	$0.166 + j0.083$	$\kappa_{13} = \kappa_{31}$	$-0.085 + j0.017$
k_{33}	$0.166 + j0.083$	$\kappa_{23} = \kappa_{32}$	$0.000 - j0.000$

Table 6 shows $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ estimated using K (the calculation sequence is described in Appendix A) and calculated from numerical simulations for the axis-, random- and biaxial-oriented models (see Fig. 3). I.e., a model labelled as A-1 has the topological parameters A from Table 2 and the dielectric parameters 1 from Table 3, this nomenclature is used for the models in Table 6. Note that, $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ corresponds to $T_{\text{xx}} = T$, where the electric field is polarized to the x-axis direction.

K was calculated using the Λ-oriented models but not from the random- and biaxial-oriented models presented in Table 6, therefore, ε_{eff} estimation agreement to simulations is not connected to data fitting. Accordingly, models A, B and C provide good agreement to $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ for different δ_{s} and $\varepsilon_{\text{s}}\varepsilon_{\text{v}}{}^{-1}$. This was expected as in a previous study [3], we have shown that the Topological relation (1) is capable of providing accurate estimations of ε_{eff} independently to δ_{v} and $\varepsilon_{\text{s}}\varepsilon_{\text{v}}{}^{-1}$ as long as inclusions are much smaller than the wavelength of the propagated microwave radiation.

TABLE VI. COMPARISSON OF $\varepsilon_{\text{EFF,XX}}$ CALCULATED FROM SIMULATIONS AND FROM RELATION (1)

Model	$\varepsilon_{eff,xx}$ (-)	
	Simulated	Calculated using (1)
A-1	$1.503 - j0.209 \pm 0.01 - j0.002$	$1.500 - j0.208$
A-2	$1.938 - j0.255 \pm 0.02 - j0.001$	$1.996 - j0.270$
A-3	$2.869 - j1.513 \pm 0.01 - j0.002$	$2.848 - j1.437$
B-1	$1.178 - j0.046 \pm 0.06 - j0.003$	$1.165 - j0.044$
B-2	$1.239 - j0.050 \pm 0.07 - j0.004$	$1.322 - j0.043$
B-3	$2.525 - j1.175 \pm 0.08 - j0.005$	$2.619 - j1.259$
C-1	$1.365 - j0.161 \pm 0.01 - j0.001$	$1.383 - j0.171$
C-2	$1.701 - j0.223 \pm 0.02 - j0.002$	$1.763 - j0.230$
C-3	$2.749 - j1.375 \pm 0.02 - j0.002$	$2.767 - j1.392$

The root-mean-square errors from the real and imaginary part of ε_{eff} were calculated from Table 6 as 0.044 and 0.039, respectively, giving in average 0.042. As K was obtained using ε_{eff} from numerical simulations. The accuracy in estimating ε_{eff} for other filaments will depend on well they resemble the virtual models. Λ -oriented models were constructed and simulated with high accuracy, hence, a high similarity between the virtual models and real samples is expected.

Table 7 shows the $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ of the filamentary structures (from Table 6) estimated using the Maxwell-Garnett (MG) mixing relation (from the EMA relations) for aligned ellipsoidal inclusions [8]. The $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ component of the Maxwell-Garnett relation reads as

$$\varepsilon_{\text{eff,xx}} = \varepsilon_{\text{v}} + \delta_{\text{s}}\varepsilon_{\text{v}}\frac{\varepsilon_{\text{s}}-\varepsilon_{\text{v}}}{\varepsilon_{\text{v}}+(1-\delta_{\text{s}})N_{\text{x}}(\varepsilon_{\text{s}}-\varepsilon_{\text{v}})}, \quad (15)$$

where N_{x} is the depolarization factor to the x-axis direction. Elongated ellipsoids resembling long thin needles (as representative of straight filaments) have a depolarization factor depending of their orientation, e.g. for x-axis oriented filaments $N_{\text{x}} = 0$ while for both y- and z-axes oriented filaments $N_{\text{x}} = 0.5$ [9]. The relation (15) was used to calculated $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ for each x-, y- and z-axis orientated filaments, then were percentage weighted to obtain the global $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ which accounts for all filaments.

TABLE VII. COMPARISSON OF $\varepsilon_{\text{EFF,XX}}$ CALCULATED FROM SIMULATIONS AND FROM MAXWELL GARNETT RELATION (15)

Model	$\varepsilon_{eff,xx}$ (-)	
	Simulated	Calculated using (15)
A-1	$1.503 - j0.209 \pm 0.01 - j0.002$	$1.528 - j0.250$
A-2	$1.938 - j0.255 \pm 0.02 - j0.001$	$2.020 - j0.342$
A-3	$2.869 - j1.513 \pm 0.01 - j0.002$	$2.847 - j1.497$
B-1	$1.178 - j0.046 \pm 0.06 - j0.003$	$1.168 - j0.061$
B-2	$1.339 - j0.050 \pm 0.07 - j0.004$	$1.284 - j0.079$
B-3	$2.525 - j1.175 \pm 0.08 - j0.005$	$2.648 - j1.315$
C-1	$1.365 - j0.161 \pm 0.01 - j0.001$	$1.382 - j0.184$
C-2	$1.701 - j0.223 \pm 0.02 - j0.002$	$1.744 - j0.253$
C-3	$2.749 - j1.375 \pm 0.02 - j0.002$	$2.745 - j1.411$

The root-mean-square errors from the real and imaginary part of ε_{eff} were calculated from Table 7 as 0.056 and 0.060, respectively, giving in average 0.058. A comparison of root-mean-square errors from Table 6 and 7 shows that Topological relation (1) produces more accurate estimations for the effective dielectric constant as those estimated from the MG relation (15).

The effect of the permittivity contrast $\varepsilon_{\text{s}}{\varepsilon_{\text{v}}}^{-1}$ upon $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ is illustrated in Figures 6 and 7 in terms of the real and imaginary susceptibility ratios of the permittivity, for the topological and MG relations. The susceptibility ratios are expressed as:

$$SR_{\text{Re,xx}} = \frac{\text{Re}(\varepsilon_{\text{eff,xx}})-\text{Re}(\varepsilon_{\text{v}})}{\text{Re}(\varepsilon_{\text{s}})-\text{Re}(\varepsilon_{\text{v}})}, \quad (16)$$

$$SR_{\text{Im,xx}} = \frac{\text{Im}(\varepsilon_{\text{eff,xx}})-\text{Im}(\varepsilon_{\text{v}})}{\text{Im}(\varepsilon_{\text{s}})-\text{Im}(\varepsilon_{\text{v}})}. \quad (17)$$

The filamentary structures used to predict $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ in Figures 6 and 7 correspond to equally x-, y- and z-axis directed filaments. A comparison of susceptibility ratios shows that the non-linearity of the $SR_{\text{Re,xx}}(f)$- and $SR_{\text{Im,xx}}(f)$-curves from the MG predictions are greatly dependent on the permittivity contrast and its curvature is highly non-symmetrical towards $\delta_{\text{s}} > 0.5$. Contrastingly, the non-linearity of the $SR_{\text{Re,xx}}(f)$- and $SR_{\text{Im,xx}}(f)$-curves from the Topological relation yields similar values as the permittivity contrast increases and it is highly symmetrical.

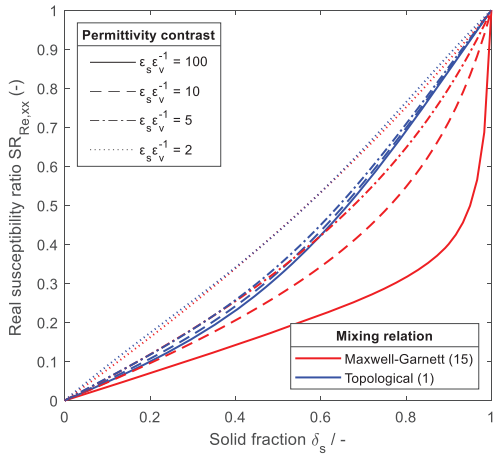


Fig. 6. Real scuceptibility ratio for the topological and Maxwell-Garnett relations prediction of $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ for a mixture with equally oriented filaments to the x-, y-, z-axis at different permittivity constrast.

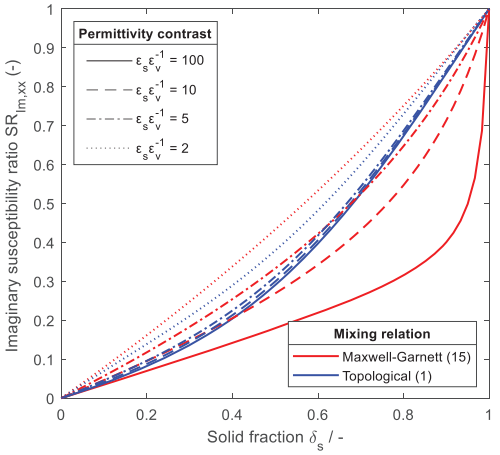
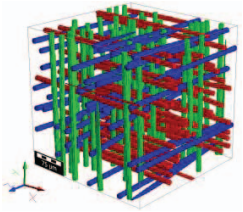


Fig. 7. Imaginary scuceptibility ratio for the topological and Maxwell-Garnett relations prediction of $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$ for a mixture with equally oriented filaments to the x-, y- and z-axis at different permittivity constrast.

As shown in Figures 6 and 7, both relations produce similar estimations at low solid fractions $\delta_{\text{s}} < 0.1$. We have simulated a filamentary structure similar to that of equally oriented filaments to the x-, y- and z-axes as representative of Figures 6 and 7, in order to find which relation best estimates $\varepsilon_{\text{eff,xx}}$. The model (illustrated in Figure 8) possess $\varepsilon_{\text{s}} = 20.00 - j10.00$, $\varepsilon_{\text{v}} = 2.00 - j1.00$ $(\varepsilon_{\text{s}}{\varepsilon_{\text{v}}}^{-1} = 10)$, and

$\delta_s = 0.1$. The simulation was performed as described in section 2 (Materials and methods).

Model T



$$\begin{bmatrix} 0.3328 & 0.0014 & 0.0003 \\ 0.0014 & 0.3339 & 0.0116 \\ 0.0003 & 0.0116 & 0.3332 \end{bmatrix}$$

Fig. 8. Illustration of the equally axis directed filamentary model. Filaments are colored in red, green and blue corresponding to their *x*-, *y*- and *z*-axis directions.

As a result of the simulation (see Table 8), the average root-mean-square errors from the real and imaginary part were calculated as 0.052 and 0.063 for the Topological and MG relation, respectively. Considering results from Table 6 - 8, the effective permittivity is in better agreement with the Topological relation. Accordingly, the Topological relation (1) using the correlation parameter K produce efficient and reliable estimations of the effective permittivity of filamentary structures. In addition, K can be obtained for any other inclusion's geometry, such as those not resembling to ellipsoids.

TABLE VIII. EVALUATION OF $\varepsilon_{\mathrm{EFF,XX}}$ ESTIMATED FROM RELATIONS AND SIMULATION

Approach	$\boldsymbol{\varepsilon_{eff,xx}}$
Simulation	$2.901 - j1.442 \pm 0.03 - j0.001$
Topological relation	$2.935 - j1.372$
Maxwell-Garnett relation	$2.812 - j1.406$

IV. CONCLUSIONS

In this work, we have studied and compared the effective permittivity of anisotropic effective media composed of filamentary structures, i.e., filaments (embedded within minimum representative volume cubes) with diameter in the micrometre-scale for an incident microwave radiation at 2.45 GHz. Filaments were virtually constructed to produce models, from which their effective permittivity were computed by numerical electromagnetic wave propagation calculations. The study was limited to solid volume fractions below 0.10 to avoid high computational burden. A new correlation parameter was proposed for evaluating the effective permittivity of filaments regarding of their spatial orientation. Calculations of the effective permittivity using the correlation parameter show good agreement to the effective permittivity obtained from numerical simulations.

As a result, the correlation parameter here presented can be used to estimate the effective permittivity for any effective media composed of straight filaments as long as their orientation tensor is provided. Furthermore, the correlation is limited to straight filaments that do not intersect or change their geometry, depending on the arrangement of the filaments this limit corresponds to a certain solid volume fraction. Moreover, as the correlation parameter is related to the geometry of the microstructure. It is possible to determine the correlation values corresponding to other geometries by conducting numerical analysis of representative virtual models (as in this work). Finally, the approach used in this work is not limited to the estimation of the effective permittivity of anisotropic media, but it is also useful for the design of materials with desired dielectric properties by manipulating the orientation of inclusions embedded in media.

V. APPENDIX

A. ε_{eff} calculation sequence.

The following points summarize the calculation sequence for $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ for filamentary structural models. The orientation tensor T, the permittivity of the filaments ε_s and background material ε_v, as well as the solid δ_s and voids δ_v volume fraction, are the input parameters.

I. Calculate the re-orientated tensors T_Λ from (6-10) using angles (θ, ϕ, φ) from Table 1 as

$$T_{xx} = [R_z(0°)][R_y(0°)][R_x(0°)][T][R_x(0°)]^T[R_y(0°)]^T[R_z(0°)]^T$$

$$T_{xy} = [R_z(45°)][R_y(0°)][R_x(0°)][T][R_x(0°)]^T[R_y(0°)]^T[R_z(45°)]^T$$

$$T_{xz} = [R_z(0°)][R_y(-45°)][R_x(0°)][T][R_x(0°)]^T[R_y(-45°)]^T[R_z(0°)]^T$$

$$T_{yx} = T_{xy}$$

$$T_{yy} = [R_z(90°)][R_y(0°)][R_x(0°)][T][R_x(0°)]^T[R_y(0°)]^T[R_z(90°)]^T$$

$$T_{yz} = [R_z(90°)][R_y(-45°)][R_x(0°)][T][R_x(0°)]^T[R_y(-45°)]^T[R_z(90°)]^T$$

$$T_{zx} = T_{xz}$$

$$T_{zy} = T_{yz}$$

$$T_{zz} = [R_z(0°)][R_y(90°)][R_x(0°)][T][R_x(0°)]^T[R_y(90°)]^T[R_z(0°)]^T$$

which gives

$$T_{xx} = \begin{bmatrix} t_{xx,11} & t_{xx,12} & t_{xx,13} \\ t_{xx,21} & t_{xx,22} & t_{xx,23} \\ t_{xx,31} & t_{xx,32} & t_{xx,33} \end{bmatrix}, \quad T_{yz} = \begin{bmatrix} t_{yz,11} & t_{yz,12} & t_{yz,13} \\ t_{yz,21} & t_{yz,22} & t_{yz,23} \\ t_{yz,31} & t_{yz,32} & t_{yz,33} \end{bmatrix},$$

$$T_{xy} = \begin{bmatrix} t_{xy,11} & t_{xy,12} & t_{xy,13} \\ t_{xy,21} & t_{xy,22} & t_{xy,23} \\ t_{xy,31} & t_{xy,32} & t_{xy,33} \end{bmatrix}, \quad T_{zx} = \begin{bmatrix} t_{zx,11} & t_{zx,12} & t_{zx,13} \\ t_{zx,21} & t_{zx,22} & t_{zx,23} \\ t_{zx,31} & t_{zx,32} & t_{zx,33} \end{bmatrix},$$

$$T_{xz} = \begin{bmatrix} t_{xz,11} & t_{xz,12} & t_{xz,13} \\ t_{xz,21} & t_{xz,22} & t_{xz,23} \\ t_{xz,31} & t_{xz,32} & t_{xz,33} \end{bmatrix}, \quad T_{zy} = \begin{bmatrix} t_{zy,11} & t_{zy,12} & t_{zy,13} \\ t_{zy,21} & t_{zy,22} & t_{zy,23} \\ t_{zy,31} & t_{zy,32} & t_{zy,33} \end{bmatrix},$$

$$T_{yx} = \begin{bmatrix} t_{yx,11} & t_{yx,12} & t_{yx,13} \\ t_{yx,21} & t_{yx,22} & t_{yx,23} \\ t_{yx,31} & t_{yx,32} & t_{yx,33} \end{bmatrix}, \quad T_{zz} = \begin{bmatrix} t_{zz,11} & t_{zz,12} & t_{zz,13} \\ t_{zz,21} & t_{zz,22} & t_{zz,23} \\ t_{zz,31} & t_{zz,32} & t_{zz,33} \end{bmatrix},$$

and $T_{yy} = \begin{bmatrix} t_{yy,11} & t_{yy,12} & t_{yy,13} \\ t_{yy,21} & t_{yy,22} & t_{yy,23} \\ t_{yy,31} & t_{yy,32} & t_{yy,33} \end{bmatrix}$.

II. Calculate g from (12-13) using T_Λ, ε_s, ε_v, δ_s, and K (see Table 3) as

$$g_{xx} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{xx,11}|\kappa_{11} + |t_{xx,12}|\kappa_{12} + |t_{xx,13}|\kappa_{13} + |t_{xx,21}|\kappa_{21} + |t_{xx,22}|\kappa_{22} + |t_{xx,23}|\kappa_{23} + |t_{xx,31}|\kappa_{31} + |t_{xx,32}|\kappa_{32} + |t_{xx,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{xy} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{xy,11}|\kappa_{11} + |t_{xy,12}|\kappa_{12} + |t_{xy,13}|\kappa_{13} + |t_{xy,21}|\kappa_{21} + |t_{xy,22}|\kappa_{22} + |t_{xy,23}|\kappa_{23} + |t_{xy,31}|\kappa_{31} + |t_{xy,32}|\kappa_{32} + |t_{xy,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{xz} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{xz,11}|\kappa_{11} + |t_{xz,12}|\kappa_{12} + |t_{xz,13}|\kappa_{13} + |t_{xz,21}|\kappa_{21} + |t_{xz,22}|\kappa_{22} + |t_{xz,23}|\kappa_{23} + |t_{xz,31}|\kappa_{31} + |t_{xz,32}|\kappa_{32} + |t_{xz,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{yx} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{yx,11}|\kappa_{11} + |t_{yx,12}|\kappa_{12} + |t_{yx,13}|\kappa_{13} + |t_{yx,21}|\kappa_{21} + |t_{yx,22}|\kappa_{22} + |t_{yx,23}|\kappa_{23} + |t_{yx,31}|\kappa_{31} + |t_{yx,32}|\kappa_{32} + |t_{yx,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{yy} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{yy,11}|\kappa_{11} + |t_{yy,12}|\kappa_{12} + |t_{yy,13}|\kappa_{13} + |t_{yy,21}|\kappa_{21} + |t_{yy,22}|\kappa_{22} + |t_{yy,23}|\kappa_{23} + |t_{yy,31}|\kappa_{31} + |t_{yy,32}|\kappa_{32} + |t_{yy,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{yz} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{yz,11}|\kappa_{11} + |t_{yz,12}|\kappa_{12} + |t_{yz,13}|\kappa_{13} + |t_{yz,21}|\kappa_{21} + |t_{yz,22}|\kappa_{22} + |t_{yz,23}|\kappa_{23} + |t_{yz,31}|\kappa_{31} + |t_{yz,32}|\kappa_{32} + |t_{yz,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{zx} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{zx,11}|\kappa_{11} + |t_{zx,12}|\kappa_{12} + |t_{zx,13}|\kappa_{13} + |t_{zx,21}|\kappa_{21} + |t_{zx,22}|\kappa_{22} + |t_{zx,23}|\kappa_{23} + |t_{zx,31}|\kappa_{31} + |t_{zx,32}|\kappa_{32} + |t_{zx,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{zy} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{zy,11}|\kappa_{11} + |t_{zy,12}|\kappa_{12} + |t_{zy,13}|\kappa_{13} + |t_{zy,21}|\kappa_{21} + |t_{zy,22}|\kappa_{22} + |t_{zy,23}|\kappa_{23} + |t_{zy,31}|\kappa_{31} + |t_{zy,32}|\kappa_{32} + |t_{zy,33}|\kappa_{33}),$$

$$g_{zz} = \delta_s\delta_v\varepsilon_s\varepsilon_v{}^{-1}(|t_{zz,11}|\kappa_{11} + |t_{zz,12}|\kappa_{12} + |t_{zz,13}|\kappa_{13} + |t_{zz,21}|\kappa_{21} + |t_{zz,22}|\kappa_{22} + |t_{zz,23}|\kappa_{23} + |t_{zz,31}|\kappa_{31} + |t_{zz,32}|\kappa_{32} + |t_{zz,33}|\kappa_{33}),$$

which gives

$$g = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix}.$$

III. Calculate $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ from (1) using ε_{s}, ε_{v}, δ_{v} and g as

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,xx}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{xx}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,xy}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{xy}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,xz}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{xz}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,yx}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{yx}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,yy}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{yy}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,yz}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{yz}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,zx}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{zx}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,zy}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{zy}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

$$\varepsilon_{\mathrm{eff,zz}} = \frac{-2\delta_{\mathrm{v}}(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{v}})}{(1+\delta_{\mathrm{v}}{}^2)} + (\varepsilon_{\mathrm{s}} + g_{\mathrm{zz}}\varepsilon_{\mathrm{v}}),$$

in which $\varepsilon_{\mathrm{eff}}$ is given as

$$\varepsilon_{\mathrm{eff}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\mathrm{eff,xx}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,xy}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,xz}} \\ \varepsilon_{\mathrm{eff,yx}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,yy}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,yz}} \\ \varepsilon_{\mathrm{eff,zx}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,zy}} & \varepsilon_{\mathrm{eff,zz}} \end{bmatrix}.$$

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by the Initiative and Networking Fund of the Helmholtz Association of German Research Centres (HGF) under the CORAERO project (KA1-Co-06).

REFERENCES

[1] W. Pabst, S. Hříbalová, "Describing the effective conductivity of two-phase and multiphase materials via weighted means of bounds and general power means," JOM, vol. 71, pp. 4005–4014, 2019.

[2] Y. Yamada, "Dielectric properties of textile materials: analytical approximations and experimental measurements – A review," Textiles, vol. 2, pp. 50-80, 2022.

[3] J.N. Camacho Hernandez, G. Link, M.. Schubert, U. Hampel, "Modeling of the effective permittivity of open-cell ceramic foams inspired by platonic solids," Materials, vol. 14, no. 7446, 2021.

[4] S.G. Advani, C.L Tucker, "The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites," J Rheol, vol. 31, pp. 751–784, 1987.

[5] A. Qing, X. Xu, and Y. B. Gan, "Effective permittivity tensor of composite material with aligned spheroidal inclusions," J. of Electromagn. Waves and Appl., vol. 18, no. 7, pp. 899-910, 2004.

[6] A. T. Yosef, A. S. A. Majeed, "Extraction of tensor parameters of general biaxial anisotropic materials," AIP Advances, vol. 10, pp. 025113, 2020.

[7] A.B. Numan, M.S. Sharawi, "Extraction of material parameters for metamaterials using a full-wave simulator," IEEE Antenn. Propag, vol. 55, pp. 202–211, 2013.

[8] A.H. Sihvola, Electromagnetic Mixing Formulas and Applications; IEE Electromagnetic Waves Series 47; Institution of Electrical Engineers: London, UK, 1999; pp. 67-71.

[9] V.A. Markel, "Introduction: to the Maxwell Garnett approximation: tutorial," J. Opt. Soc. Am. A., vol. 33, pp. 1244-1256, 2016.

Gold nanorods for near-infrared attenuation in SnO_2:F thin films

Nanovarillas de oro para la atenuación del infrarrojo cercano en películas delgadas de SnO_2:F

Damián Montero
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panama
damian.montero@utp.ac.pa

Franck Aguilar
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panama
franck.aguilar@utp.ac.pa

Héctor Miranda
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panama
hector.miranda@utp.ac.pa

Alfredo Campos
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panama
alfredo.campos@utp.ac.pa

***Abstract*— Glass industry looks for climate-adaptive windows, the so-called "smart windows," to promote energy-saving buildings and homes. Tropical countries experience high temperatures for most of the year and infrared blocking windows are convenient to promote low air conditioning usage and save energy. In this work, we propose a glass coating consisting of gold nanorods deposited on thin films of SnO2:F (FTO) to attenuate the near- and mid-infrared radiation from the sun and hot objects. FTO is a low emissivity material that is transparent in the visible and reflects mid-infrared radiation. On the other hand, metallic rod-shaped nanoparticles can attenuate near-infrared radiation. The prepared samples showed a high reflectance from 20000 nm and attenuation of near-infrared, all this without compromising the passage of visible light.**

Keywords—surface plasmon, gold nanorod, thin film, infrared radiation, energy saving

***Resumen* — La industria del vidrio busca ventanas adaptables al clima, las llamadas "ventanas inteligentes", para promover edificios y casas que ahorren energía. Los países tropicales presentan altas temperaturas durante casi todo el año y las ventanas de bloqueo infrarrojo son convenientes para promover un bajo uso de aire acondicionado y ahorrar energía. En este trabajo proponemos un recubrimiento para el vidrio el cual consiste en nanovarillas (nanorods en inglés) de oro depositados sobre películas delgadas de SnO_2:F (FTO por sus siglas en inglés) para atenuar la radiación infrarroja cercana y media proveniente del sol y de objetos calientes del exterior. El FTO es un material de baja emisividad que es transparente en el visible y refleja la radiación infrarroja media. Por otro lado, las nanopartículas metálicas en forma de rods pueden atenuar la radiación infrarroja cercana. Las muestras preparadas mostraron una alta reflectancia desde los 2000 nm y una atenuación del infrarrojo cercano, todo esto sin comprometer el paso de luz en el visible.**

Palabras claves —plasmón de superficie, nanorod de oro, película delgada, radiación infrarroja, ahorro energético

I. Introduction

Las propiedades ópticas de los metales a granel cambian abruptamente cuando se reducen de tamaño hasta la nanoescala. En las nanopartículas metálicas aparece el fenómeno de resonancia de plasmones superficiales (SPR, por sus siglas en inglés), el cual corresponde a la oscilación del gas de electrones libres por excitación de radiación electromagnética. El tamaño y la geometría de las nanopartículas, así como su entorno, modifican la frecuencia de resonancia. Estas características se han utilizado para sintonizar la resonancia de los plasmones de superficie a frecuencias útiles para el desarrollo de diferentes aplicaciones tecnológicas tales como: celdas solares [1], biosensores [2], dispersión Raman de superficie amplificada [3], terapia contra el cáncer [4], fotocatálisis [5], entre otras. La frecuencia de resonancia se puede sintonizar en el rango del infrarrojo cercano en nanopartículas metálicas de geometrías asimétricas como rods, triángulos, discos, entre otras, y así poder desarrollar aplicaciones en el infrarrojo cercano como lo es la ventana de bloqueo infrarrojo propuesta en este trabajo. Desde hace varios años, la tecnología de ventanas viene proponiendo ventanas de ahorro energético a través de las llamadas 'ventanas inteligentes' que se basan en materiales que cambian sus propiedades ópticas por excitaciones eléctricas o térmicas (materiales electrocrómicos y termocrómicos, respectivamente) [6, 7]. El objetivo de estas ventanas es bloquear (o permitir) la entrada de luz infrarroja para crear edificios adaptables al clima. Este tipo de ventanas es especialmente útil en países con cambios extremos de temperatura durante el invierno y el verano. Por otro lado, en países tropicales, donde la exposición al sol y las altas temperaturas son casi constantes a lo largo del año, es oportuno desarrollar ventanas pasivas de bajo costo para bloquear la radiación infrarroja del exterior y evitar el calor en el interior del edificio y mantenerlo fresco. Esto evita el uso excesivo de sistemas de aire acondicionado y promueve el ahorro de energía. Es importante tener en cuenta que la radiación visible (longitud de onda 400-700 nm) debe pasar a través de la ventana sin atenuarse significativamente y la región del infrarrojo debe atenuarse tanto como sea posible ya que es la responsable del calor. En el espectro de la radiación solar, el 3% de la energía representa radiación ultravioleta, el 44% se concentra en la región visible y el 53% se concentra en la región infrarroja [8], lo cual representa un porcentaje bastante alto de luz que genera calor. La radiación infrarroja que entra a un edificio o casa no solo proviene del sol sino también de objetos calientes en el ambiente. Por ejemplo, un

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00122

cuerpo a 40 °C emite radiación infrarroja con un máximo a los 10000 nm [8]. Esta radiación infrarroja de longitudes de onda larga es conocida como infrarroja-media y puede ser atenuada por recubrimientos de baja emisividad [9] como las películas delgadas metálicas o películas delgadas de óxidos semiconductores dopados [10]. La radiación infrarroja cercana (700-2500 nm) puede ser atenuada por nanopartículas metálicas como nanovarillas (nanorods en inglés), nanoplatos, estructuras núcleo-carcasa [8, 11] y nanopartículas óxido semiconductoras dopadas [12]. En este trabajo, utilizamos nanorods de oro para bloquear la radiación del infrarrojo cercana, los cuales se depositan sobre películas delgadas de SnO_2:F (conocido como FTO por sus siglas en inglés) de alrededor de 536 nm de espesor, que sirven para evitar el paso de la radiación infrarroja media. De esta forma se busca atenuar tanto el infrarrojo cercano como el medio. El FTO tiene la gran ventaja de ser estable y económico en comparación con otros óxidos semiconductores de baja emisividad. Además, es posible depositarlo con técnicas simples y económicas como la de rocío pirolítico. Finalmente usamos figuras de mérito para extraer información cuantitativa sobre la cantidad de luz visible e infrarroja que pasa a través del sistema.

II. Método Experimental

A. Preparación de películas de FTO y de nanorods de oro

Se depositaron películas delgadas de FTO basados en [13], con un espesor de alrededor de 536 nm mediante la técnica de rocío pirolítico a 475 °C a partir de los precursores $SnCl_2.2H_2O$ y NH_4F con una relación F/Sn=0.15. La deposición se realizó sobre sustratos de vidrio (portaobjetos) previamente limpiados.

Se prepararon soluciones coloidales de nanorods de oro mediante el método seedless basados en Ali et al. [14]. En la preparación se utilizó una solución de ácido cloroáurico ($HAuCl_4$) al 30% wt, Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB), Borohidruro de sodio ($NaBH_4$), nitrato de plata ($AgNO_3$), citrato de sodio ($C_6H_8O_6$) y ácido clorhídrico (HCl) al 37 % wt para controlar el pH a un valor cercano a uno. Las soluciones coloidales de nanopartículas se depositaron sobre las películas de FTO mediante la técnica de drop-casting. Estas preparaciones arrojaron relaciones de aspecto de los rods (RA=largo/diámetro) cerca de 3. De igual forma se utilizaron soluciones de nanorods de oro comerciales de la empresa Sigma Aldrich con relaciones de aspecto de 2.4, 3.8 y 4.2.

B. Caracterización óptica y morfológica

Las soluciones de nanorods de oro se caracterizaron ópticamente por medidas de absorbancia. Las películas de FTO con los nanorods se estudió ópticamente por medidas de transmitancia y reflectancia especular. Las mediciones ópticas se realizaron en un UV-1800 Shimadzu UV-Visible (190-1100 nm) y un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier IRAffinity-1S Shimadzu (350-7800 cm^{-1}, 28572-1282 nm). Además, los nanorods preparados se caracterizaron morfológicamente por microscopia electrónica de transmisión (TEM) en un JEOL 1010 y la medición de tamaños se realizó con el software libre ImageJ.

III. Resultados y Discusión

La caracterización morfológica de las soluciones de nanorods de oro preparadas en el laboratorio se realizó mediante microscopia electrónica de transmisión (TEM) y las imágenes se presentan en la Fig. 1. De las imágenes TEM obtenidas y mediante el software ImageJ se obtuvo que la relación de aspecto (largo/diámetro) de los rods en promedio es de aproximadamente 3. Además de los nanorods, las muestras también presentan nanopartículas esféricas.

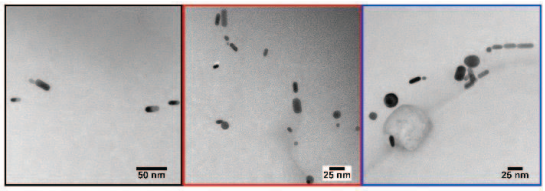


Fig. 1. Imágenes TEM de los nanorods de oro preparados en el laboratorio. La relación de aspecto de los rods es de alrededor de 3. Además de los rods también se presentan esferas.

En la Fig.2 se muestran los espectros de absorbancia normalizados de las muestras preparadas en el laboratorio y las comerciales adquiridas de la compañía Sigma Aldrich. Se puede observar que, en todas las muestras, tanto las preparadas como las comerciales, aparece un pico cerca de los 520 nm. En el caso de las muestras preparadas en el laboratorio este pico corresponde a la contribución de las esferas en la muestra (ver Fig.1), ya que es bien sabido que las esferas de oro pequeñas presentan señal cerca de los 520 nm [15]. Por otro lado, este pico a 520 nm es menos intenso en las muestras comerciales. En este caso la población de esferas en la muestra es prácticamente despreciable y el pico a 520 nm se explica por la contribución del plasmón de superficie de tipo transversal [16], que corresponde a la oscilación de carga a lo largo del diámetro del nanorod. Los picos que aparecen a longitudes de onda mayor (>600 nm) en las muestras hechas en el laboratorio y las comerciales se deben al plasmón longitudinal, el cual corresponde a la oscilación de carga a lo largo del eje longitudinal del rod. Este tipo de plasmón es altamente sensible a la relación de aspecto y entre mayor sea la relación de aspecto, mayor será el corrimiento espectral a longitudes de onda mayores.

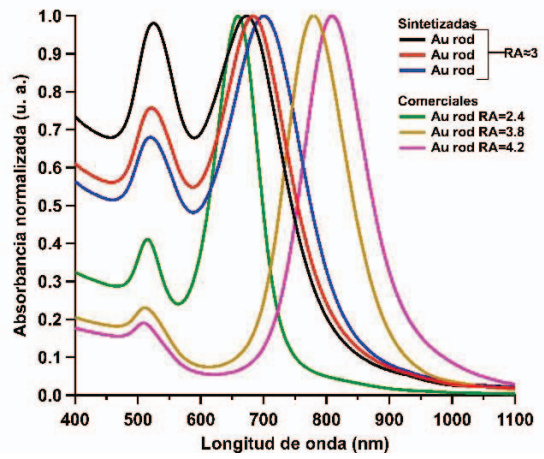


Fig. 2. Espectros de absorbancia normalizados de muestras de nanorods de oro preparadas en el laboratorio y comerciales.

Una vez estudiada las propiedades ópticas de las soluciones de nanorods se procedió a estudiar las propiedades de transmitancia y reflectancia de las películas de FTO

depositadas sobre vidrio, las cuales son presentadas en la Fig.3. Junto con los espectros del FTO, también se han colocado los espectros del vidrio y la irradiancia solar a AM1.5 para mostrar la señal espectral emitida por el sol y tenerla de referencia. La región del visible (400-700 nm) se ha marcado con los colores característicos de este rango espectral. Como se observa en la Fig.3a, la transmitancia del vidrio se mantiene por arriba de 80% desde los 400 nm hasta los 5000 nm. Esto implica que el vidrio deja pasar tanto visible como infrarrojo cercano y parte del infrarrojo medio. Por otro lado, el FTO presenta una alta transmitancia en el visible y esta empieza a disminuir desde los 800 nm y va cayendo lentamente hasta que se llega a cero a los 3000 nm. La caída a cero de la transmitancia del FTO se debe a un aumento considerable de la reflectancia tal cual lo revela la Fig.3b, lo que demuestra que el FTO es un excelente material para reflejar la radiación infrarroja con longitudes de onda mayores a 3000 nm, evitando así el paso de radiación infrarroja proveniente de objetos calientes que emiten radiación en el infrarrojo medio (10000 nm para un objeto a 40 °C). Cabe mencionar que a pesar de que el vidrio presenta una baja transmitancia desde los 5000 nm, esta reducción en transmitancia no está relacionada a un aumento de reflectancia, tal cual lo revela la Fig. 3b.

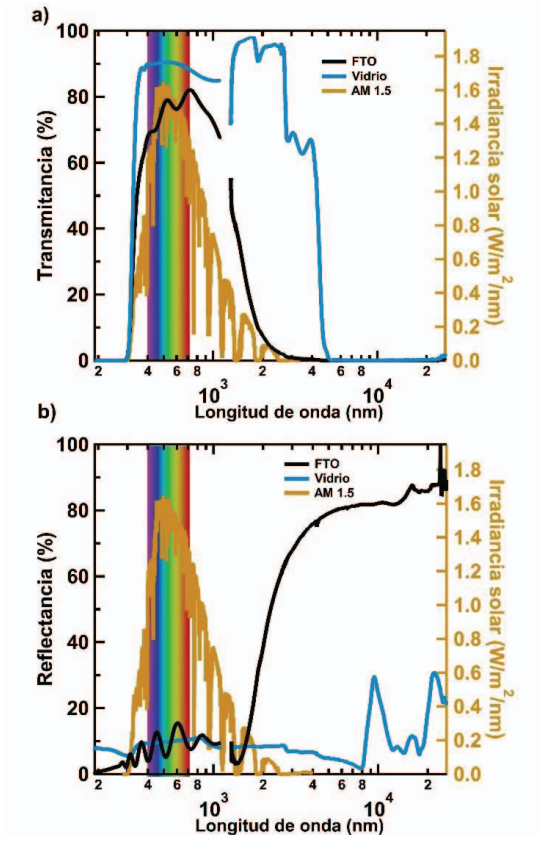


Fig. 3. a) Espectros de transmitancia del vidrio y el FTO. b) Espectros de reflectancia del vidrio y el FTO. La discontinuidad en los espectros entre 1100 y 1282 nm se debe al uso de dos equipos diferentes para la medición. La irradiancia solar a AM1.5 es mostrada a modo de referencia y la región del visible (400-700 nm) se marcó con los colores característicos de este rango espectral.

Las películas de FTO presentan propiedades de atenuación (reducción de transmitancia) para el infrarrojo medio y parte del cercano. Para tratar de atenuar aún más la radiación infrarroja cercana, se depositaron nanorods de oro sobre la superficie de las películas de FTO por el método de drop-casting. De todas las muestras de rods estudiadas se optó por utilizar las muestras comerciales y depositarlas sobre el FTO, ya que el pico a los 520 nm en estas muestras es menos intenso y por lo tanto menos afectan el visible. Se depositaron 200 µl de cada una solución de nanorods sobre un área de 1 x 2.5 cm^2. La concentración de los nanorods de relación de aspecto de 2.4 era de 45 µg/ml y la de los rods de relaciones de aspecto de 3.8 y 4.2 era de 30 µg/ml. Los espectros de transmitancia del conjunto FTO-nanorods se muestran en la Fig.4a, donde se puede observar que los nanorods provocan una ligera caída de la transmitancia para longitudes de onda mayores a los 700 nm. Sin embargo, en el visible también se presenta una disminución de la transmitancia para los rods de relación de aspecto de 2.4 y 3.8. Esto se debe a que para este tipo de rods la señal del plasmón transversal en el visible es más intensa que para el rod de relación de aspecto de 4.2 (ver Fig. 2), provocando así una disminución de transmitancia en el visible. El patrón de interferencia (máximos y mínimos) observados en el FTO se debe al espesor nanométrico de la película.

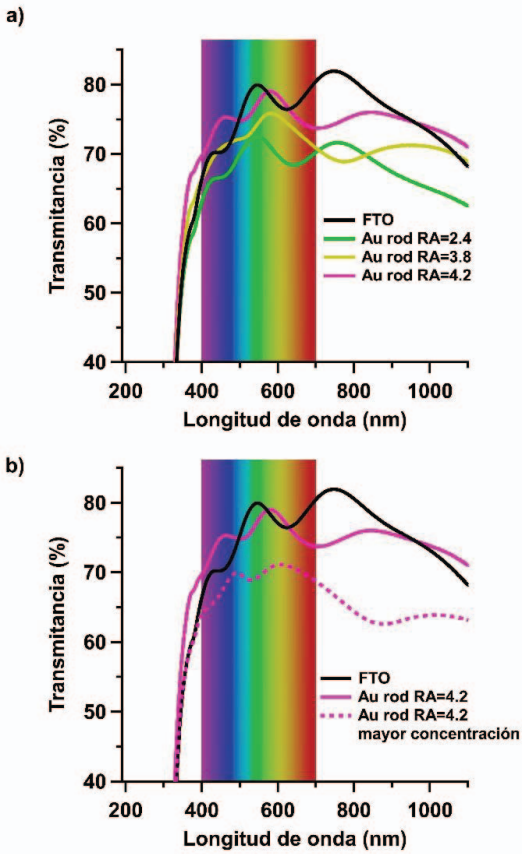


Fig. 4. a) Espectros de transmitancia del FTO y FTO con nanorods de oro de diferentes relaciones de aspecto. b) Espectros de transmitancia del FTO y FTO con nanorods de oro de relación de aspecto de 4.2 usando 200 y 600 µl de solución.

En la Fig.4a se observa que el rod de relación de aspecto de 4.2 es el que menos afecta el visible y por lo tanto se procedió a aumentar la cantidad de solución a 600 µl sobre un sustrato de FTO. La Fig.4b muestra la transmitancia del FTO con mayor concentración de rods de relación de aspecto de 4.2. Se puede observar que existe tanto una disminución en el visible como en el infrarrojo, sin embargo, el paso del infrarrojo decrece en mayor medida, lo cual es beneficioso para atenuar el infrarrojo.

Para cuantificar el paso de luz en el visible (400-700 nm) y el paso de luz en parte del infrarrojo cercano (700-1100 nm) en la data de la Fig.4b, se utilizaron las siguientes figuras de mérito [8]:

$$VT = \frac{\int_{400\ nm}^{700\ nm} I_{solar}(\lambda)\, T(\lambda) d\lambda}{\int_{400\ nm}^{700\ nm} I_{solar}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$IRT = \frac{\int_{700\ nm}^{1100\ nm} I_{solar}(\lambda)\, T(\lambda) d\lambda}{\int_{700\ nm}^{1100\ nm} I_{solar}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

En (1), VT significa transmisión en el visible y va de 0 a 1, I_{solar} es la irradiancia solar mostrada en la Fig. 3 y T es la transmitancia mostrada en la Fig.4b. En el caso ideal de una transmitancia igual a 1 en el visible, la figura de mérito VT vale 1. En (2), IRT significa transmisión en el infrarrojo y va de 0 a 1, I_{solar} es la irradiancia solar mostrada en la Fig.3 y T es la transmitancia mostrada en la Fig.4b. En el caso ideal de una transmitancia igual a 0 en el infrarrojo cercano, la figura de mérito IRT vale 0. Se busca entonces que VT sea lo más cercano a uno y IRT lo más cercano a cero. La Fig.5 muestra los valores de VT y IRT obtenidos usando (1) y (2) y a partir de la data de la Fig.4. Se puede observar para el caso del FTO que la transmisión en el infrarrojo (700-1100) es mayor que la del visible, esto representa un caso poco conveniente. Sin embargo, cuando se colocan los nanorods esta situación se invierte y la transmisión del visible es mayor que la transmisión del infrarrojo. Vemos que al aumentar la concentración de rods la diferencia entre la transmisión visible y la infrarroja se hace más pronunciada, lo cual es conveniente para la aplicación propuesta en este trabajo.

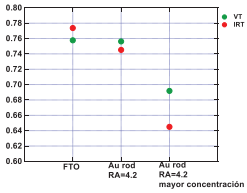


Fig. 5. Figuras de mérito para la transmisión en el visible (VT) y parte del infrarrojo cercano (IRT) de las muestras de la Fig. 4.

Un valor de VT cerca del 0.7 es un valor aceptable para aplicaciones en ventanas, tal como se ha obtenido en este trabajo. Si se aumenta aún más la concentración de rods el valor de VT disminuye y deja de ser práctico.

IV. Conclusiones

Se prepararon películas delgadas de FTO por rocío pirolítico y se depositaron nanorods de oro sobre las películas para evaluar las propiedades de reflectancia y transmitancia de la luz. En las medidas de FTIR, las películas delgadas de FTO presentan un aumento en la reflectancia a partir de una longitud de onda de 2000 nm, alcanzando una reflectancia del 80% en longitudes de onda mayores de 5000 nm, lo que demuestra una alta capacidad para reflejar la radiación del infrarrojo medio. Por otro lado, en el visible (400-700 nm), las películas de FTO presenta una alta transmitancia, lo cual las hace altamente útil para dejar pasar la luz en este rango. En el rango infrarrojo cercano de 700 a 1100 nm, las películas de FTO también presentan una transmitancia elevada lo cual no es conveniente ya que se busca evitar el paso de esta radiación. Sin embargo, mediante el uso de nanorods de oro con alta concentración (600 µl), la transmisión en el infrarrojo cercano de 700 a 1100 nm presentó una disminución de 17% con respecto al FTO sin nanopartículas. Por otro lado, la transmisión visible solo presentó una disminución del 9% con respecto al FTO sin nanopartículas. Para atenuar aún más el infrarrojo cercano una posibilidad sería la deposición de nanorods por técnicas más sofisticadas para lograr mejor homogeneidad en la deposición, como sería la técnica de spin-coating pero se debe tomar en cuenta que es más cara. Otro estudio interesante sería utilizar nanopartículas semiconductoras dopadas como el SnO_2:F ya que éstas presentan plasmones de superficie en el infrarrojo cercano sin presentar señal en el visible y son más baratas de fabricar que las metálicas.

Reconocimiento

Alfredo Campos agradece a la SENACYT, proyecto FID18-066, por el financiamiento que permitió el desarrollo de esta investigación. Alfredo Campos y Héctor Miranda agradecen al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por el apoyo financiero.

Referencias

[1] K.R. Catchpole, and A. Polman, "Plasmonic solar cells," Opt. Express,vol. 16, 21793-21800, 2008K. Saha, S. S. Agasti, C. Kim, X. Li, and V. M. Rotello, "Gold Nanoparticles in Chemical and Biological Sensing", Chem. Rev. vol. 112, 5, 2739–2779, 2012

[2] A.M. Shrivastav, U. Cvelbar, and I.A Abdulhalim, "comprehensive review on plasmonic-based biosensors used in viral diagnostics". Commun. Biol. 4, 70, 2021.

[3] Y. Ma, D. Sikdar, A. Fedosyuk, L. Velleman, D. J. Klemme, S. -H. Oh, A. R. J. Kucernak, A. A. Kornyshev, and J. B. Edel, "Electrotunable Nanoplasmonics for Amplified Surface Enhanced Raman Spectroscopy", ACS Nano, vol. 14, 1, 328–336, 2020

[4] M. R. K. Ali, Y. Wu, and M. A. El-Sayed, "Gold-Nanoparticle-Assisted Plasmonic Photothermal Therapy Advances Toward Clinical Application", J. Phys. Chem. C, vol. 123, 25, 15375–15393, 2019.

[5] J. Zhao, S. C. Nguyen, R. Ye, B. Ye, H. Weller, G. A. Somorjai, A. P. Alivisatos, and F. D. Toste, "A Comparison of Photocatalytic Activities of Gold Nanoparticles Following Plasmonic and Interband Excitation and a Strategy for Harnessing Interband Hot Carriers for Solution Phase Photocatalysis", ACS Cent. Sci., vol. 3, 5, 482–488, 2017

[6] V. Rai, R. S. Singh, D. J. Blackwood, and D. Zhili, “A Review on Recent Advances in Electrochromic Devices: A Material Approach”, Adv. Eng. Mater., 2000082, 2020

[7] Butterworth-Heinemann, Building Envelope, Handbook of Energy Efficiency in Buildings, 2019, pp. 295-439

[8] L. V. Besteiro, X.-T. Kong, Z. Wang, F. Rosei, and A. O. Govorov, “Plasmonic Glasses and Films Based on Alternative Inexpensive Materials for Blocking Infrared Radiation,” Nano Lett., vol 18, 3147−3156, 2018.

[9] K. Sun, W. Zhou, X. Tang, and F. Luo, “Application of indium tin oxide (ITO) thin film as a low emissivity film on Ni-based alloy at high temperature”, Infrared Physics & Technology, 78, 156–161, 2016

[10] G. Ding, and C. Clavero, "Silver-Based Low-Emissivity Coating Technology for Energy- Saving Window Applications", in Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings. London, United Kingdom: IntechOpen, 2017

[11] V. K. Pustovalova, and L. G. Astafyevab, “Modeling of optical properties of plasmonic core–shell nanoparticles embedded in glass for filtering of solar radiation”, Nano-Structures & Nano-Objects, 27, 100776, 2021

[12] H. Matsui, and H. Tabata, "Infrared Solar Thermal-Shielding Applications Based on Oxide Semiconductor Plasmonics", in Nanoplasmonics - Fundamentals and Applications. London, United Kingdom: IntechOpen, 2017

[13] H. Miranda, S. Velumani, C. A. Samudio Pérez, J. C. Krause, Francis D’ Souza, Elida De Obaldía, and E. Ching-Prado, “Effects of changes on temperature and fluorine concentration in the structural, optical and electrical properties of SnO_2:F thin films”, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 30, 15563–15581, 2019

[14] M. R. K. Ali, B. Snyder, and M. A. El-Sayed, “Synthesis and Optical Properties of Small Au Nanorods Using a Seedless Growth Technique”, Langmuir, 28, 25, 9807–9815, 2012

[15] J. Kimling, M. Maier, B. Okenve, V. Kotaidis, H. Ballot, and A. Plech, “Turkevich Method for Gold Nanoparticle Synthesis Revisited”, J. Phys. Chem. B, 110, 32, 15700–15707, 2006

[16] H. Chen, L. Shao, Q. Lia, and J. Wang, “Gold nanorods and their plasmonic properties”, Chem. Soc. Rev., 42, 2679, 20

Study of gold, silver and copper thin films for plasmonic sensors applications

Paolo Leonelli
Facultad de Inegniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama City, Panama
paolo.leonelli@utp.ac.pa

Héctor Miranda
Facultad de Ciencias y Tecnologías
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama City, Panama
hector.miranda@utp.ac.pa

Alfredo Campos
Facultad de Ciencias y Tecnologías
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama City, Panama
alfredo.campos@utp.ac.pa

***Abstract*—The sensitivity response of plasmonic sensors depends, among other factors, on the thickness and metal used in the metallic thin film. In these films, the phenomenon of surface plasmon resonance occurs at the interface between the metal and the dielectric surrounding material. In this work we studied and compared the suitability for sensor application of gold, silver and copper films with different thicknesses. We started with the thermal deposition of the different thin films, then we performed UV-visible spectroscopy on these films to obtain their transmittance curves. From these curves and using a data analysis program, we fitted the transmittance with a Drude-Lorentz model which gives the thicknesses and permittivities of the metallic thin films. We tested the validity of the fitting by comparing the modeled permittivities with the literature. In addition, the reflectivity response of each film was measured and compared with simulated values. Finally, the best thin film was exposed to alcohol gas at different concentrations to evaluate its sensor properties.**

Keywords—surface plasmon resonance, metallic thin film, thermal deposition, gas sensor

I. Introduction

Surface plasmon resonance (SPR) is a phenomenon in which the collective oscillation of free electrons in a metal occurs at the metal-dielectric interface under the excitation of electromagnetic radiation when certain system requirements are met [1][2]. This event was observed for the first time in 1968 by A. Otto [3] and since then it has been widely studied in the plasmonic field of research [4] and has been used for different applications, one of the most common is in the development optical sensors [5]. For this type of sensors, the experimental configuration proposed by E. Kretschmann in 1971 [6], which currently bears his name, is of great importance. In this configuration, the SPR has the property of being excited at a specific angle of incidence, which depends on the refractive index of the surrounding medium [7]. This property allows to observe variations in the composition of a medium in a non-invasive way, in addition offers the possibility of real time studies at a high level of sensitivity and reproducibility. Therefore, they are becoming increasingly popular sensors in areas of biochemistry, biology and medical sciences. Although they have the disadvantage of having a high market cost, which to date has limited their use to industries with a high added value [8].

In addition, the intensity of the sensing response of devices based on SPR depends on the thickness and the metal of the thin film. The objective of this work was to prepare gold, silver and copper thin films with different thicknesses to study the effects that different metals and thicknesses had on plasmonic properties for sensor applications. Finally, the best sample was exposed to ethanol gas.

Project funding provided by SENACYT grant FID18-066 and SNI of Panama

II. Methods

A. Metal thin film deposition

The metallic thin films were deposited on glass substrates 1.1 mm thick (n=1.5) by thermal evaporation in a KEY Model KV-301 evaporator, which reaches pressures of around 10^{-6} torr. The metals to be evaporated were acquired commercially through the RDMathis company. The thickness of the evaporated film was controlled indirectly through the metal mass (m) to be evaporated using the equation

$$m = \frac{4\pi r^2}{C}\rho d \quad (1)$$

where r is the distance from the thermal boat (in our case we used 17cm), d is the desired thickness, ρ is the density of the metal and C is a correction factor that takes into account the fact that the evaporation boat prevents the metal vapor from forming a perfect sphere and instead only allows it to propagate upward in a conic like shape, we used as a starting point $C = 4$ to prepare 30, 50 and 70 nm thickness and later we obtained experimentally a better approximation. Since we don't know the exact correction factor value, and in any case equation 1 is an idealization of the procedure, we don't know how close the thicknesses of the prepared films are from the desired one and we will have to obtain the thickness value from transmittance spectra modeled with a Drude-Lorentz model.

B. Optical characterization and transmittance curves fitting

We are interested in the transmittance optical properties of the metal thin films because they allow us to obtain two types of information through a fitting process. First, we can obtain an approximated thickness of the films, which is the closest we can get to know the real film thickness, and second, we can compare the permittivities obtained from the fitting procedure to the ones available in the literature.

The transmittance curves for the thin metal films were obtained using a UV-visible spectrometer (190-1100 nm), and from these curves we obtain a Drude-Lorentz model by means of a fitting procedure using the data analysis program RefFIT [9]. For this procedure we start from the Drude-Lorentz model parameters proposed by Rakić [10], and the permittivities at infinite frequency (ϵ_∞) proposed by Roux [11] for gold and silver and Gharbi [12] for copper, then we performed the fitting to adjust model curves to the experimental one. To model a more realistic system, the glass substrate was taken into account in the fitting procedure, the values obtained are shown in the results section. From the Drude-Lorentz model using the data analysis program we obtain the real and complex permittivities and we compare them to the experimental permittivities of the different metals.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00123

C. *Surface plasmon resonance study*

The study of surface plasmon resonance of the deposited films were performed on an optical table, with a Kretschmann configuration. This configuration consists of a glass block, generally a prism that has a metal thin film evaporated or coupled in one surface and has a light source used to illuminate the prims metal interface at varying angles of incidence, as shown in Fig. 1. In our case the films were coupled to a BK7 glass prism through an immersion liquid (n=1.5) in the middle. The prism was then mounted on a servomotor to change the angle of incidence of the light produced by a stationary laser of 632.8 nm wavelength. The reflectance was measured using a silicon photodiode mounted on a servo motor, which moves twice as fast as the servo motor that moves the prism. Both servomotors were controlled using a LabVIEW controller. The photodiode measurements are read by an Arduino microcontroller that sends this information to the same LabVIEW program that is controlling to motors. In addition, the laser p-type polarization required for the occurrence of SPR is achieved using a waveplate and a linear polarizer that are located between the light source and the prism. All the equipment were obtained from Thorlabs company.

In addition, we compare the experimental reflectance with respect to the angle of incidence with the theoretical values obtained by simulating the system in MATLAB (code: https://physlab.org/experiment/surface-plasmon-resonance/) that solves the Fresnel equation for a two interface system and using as input the film thickness obtained from our Drude-Lorentz model.

III. Results

A. *Thin films transmittance*

The transmittance of thin films of a specific metal has a maximum at a constant wavelength, independent of the film thickness [11]. We observed in Fig. 2a that for gold the maximum value occurs at around 500 nm, in 1b for silver it is located at around 325 nm and in 1c for copper it is at around 575 nm.

The relation between the transmittance and the metal thin film mass can be observed in Fig. 2, where the transmittance decreases if the mass used for evaporation increases.

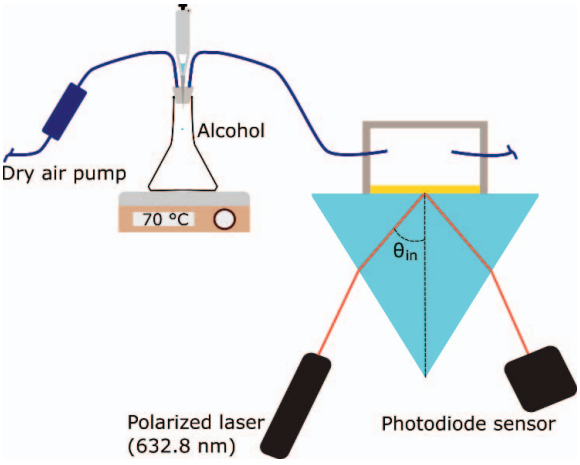


Fig. 1. Kretschmann configuration with gas chamber and alcohol flow system mounted to evaluate alcohol sensor properties.

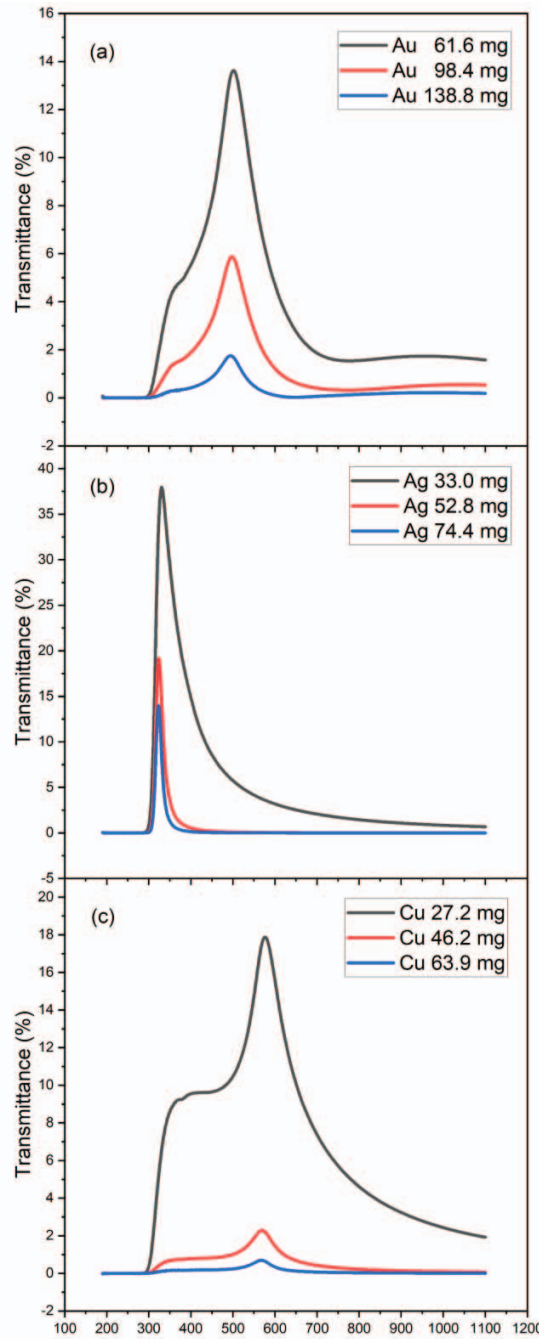


Fig. 2. Transmittances in the 190-1100 nm region a) Gold deposited thin films. b) Silver deposited thin films. c) Copper deposited thin films.

B. *Drude-Lorentz RefFIT models*

The film thicknesses are unknown at this point, from the evaporated mass we have an idea of the thickness values using equation 1, but to obtain a better estimation of the thickness we used a fitting procedure based on Drude-Lorentz model. For gold the transmittance curve fitted with a Drude-Lorentz model is in Fig. 3a. From this fitting, the real and imaginary permittivities are extracted and are shown in Fig. 3b. To test the accuracy of our model we compared the model

permittivities curves, which represent a physical property of the metals, with experimental ones obtained by Johnson and Christy [13] as shown in Fig. 3b. Since the Drude-Lorentz model transmittance match closely to the experimental transmittance and the model permittivities closely resemble the ones proposed by Johnson and Christy, we are confident that our model provides good approximate thickness values for the different metal thin films.

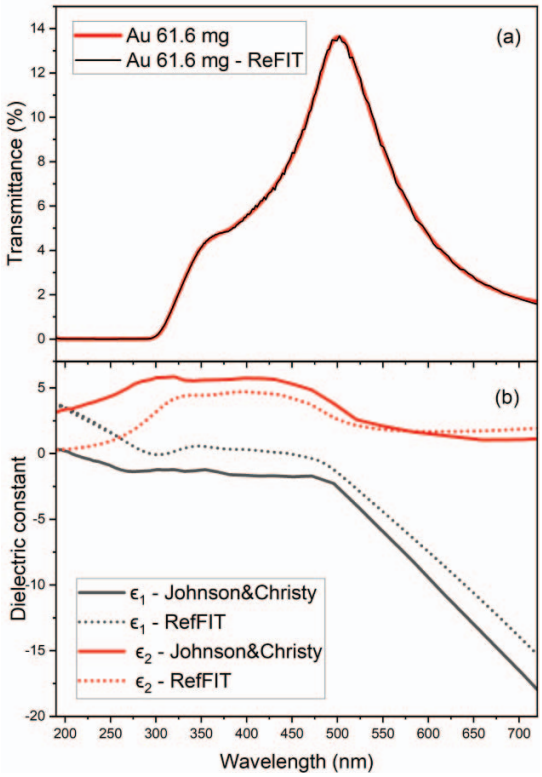


Fig. 3. a) Comparison of measured transmittances with the Drude-Lorentz model transmittances for gold thin films. b) Comparison of Drude-Lorentz model permittivities with the ones obtained by Johnson and Christy [13].

The same fitting procedure was performed for the remaining metal thin films and the Table 1 shows the thickness values obtained. We observe that the thickness values are in all cases higher than the expected using the equation 1 with a correction factor of 4, which leads us to think that this factor should be higher. Since the thickness obtained from fitting have their origin in the experimental transmittance of the films, we take them as the real thickness and using the same equation 1 we obtain new corrected factor values. The results are 6.66 for gold, 6.12 for silver and 5.44 for copper, which gives us a new correction factor of approximately 6.1.

C. Reflectance relation with the laser light incident angle

The metallic thin films reflectance in the Kretschmann configuration, when certain conditions of light polarization (p-type), wavelength (632.8 nm laser in this case) and angle of incidence are met, drops drastically as a consequence of the appearance of surface plasmon resonance in the interface between the metal and surrounding medium. This phenomenon is observed for varying thicknesses and metals in Fig. 4, which allows us to compare the behavior of different metal thin films deposited by evaporation.

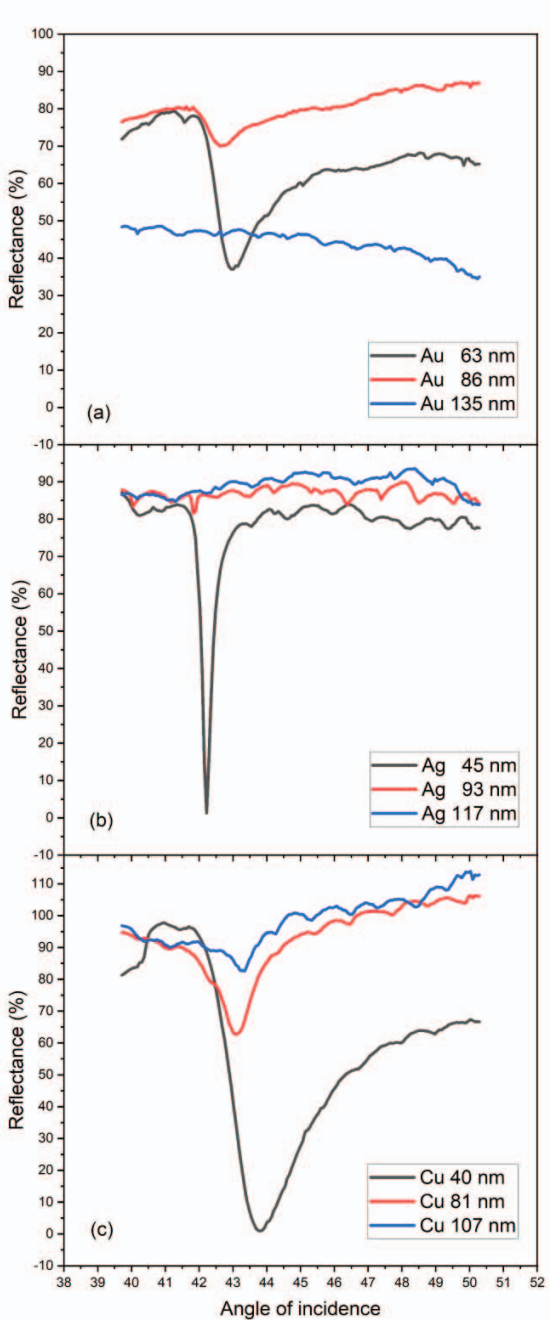


Fig. 4. Comparison of Reflectance behavior of the different evaporated thin films.

For the gold thin films, we observed in Fig. 4a how the 63 nm film presents the largest drop in reflectance among the others, with a descent of approximately 40%. The 86 nm film presents a drop of almost 10% in the 42-43 degrees range of incident angle, the same range as the 63 nm film. The 135 nm film shows no visible effects of the surface plasmon resonance in the incident angles range where the other two gold films showed the effects of SPR.

TABLE I. THICKNESS OF METAL FILMS

Metal	Film	Mass [mg]	Expected thickness from (1) using C=4 [nm]	Thickness from fitting procedure [nm]
Au	1	61.6	30	62.66
	2	98.4	50	86.22
	3	138.8	70	135.03
Ag	1	33.0	30	45.05
	2	52.8	50	92.79
	3	74.4	70	117.3
Cu	1	27.1	30	40.13
	2	46.2	50	80.55
	3	63.9	70	106.75

In Fig. 4b we observed that the 45 nm silver film presents a reflectance drop of approximately 80%, falling to almost zero, and the change in degrees of the angle of incidence that it takes the reflectance to decrease and increase back to a stable value is the smallest compared with the other films shown in Fig. 4. Although the 45 nm silver thin films show the best SPR response, the other silver films show almost no visible effect, the small drop present for the 93 silver films is just 5% comparable to the noise levels and therefore it is not pronounced enough to be attributed to SPR.

For the copper case the reflectance curves are shown in Fig. 4c, we observe how the drop in reflectance is meaningful for the three different thickness films. The 40 nm film presents a drop of almost 100%, meanwhile the 81 and 107 nm films present approximately 30% and 15%, respectively. Again, as is the case with the other metals studied the biggest drop occurs for the film with a thickness closer to 50 nm which is the best thickness value reported in the literature [14][153].

In addition, in Fig. 4 we observe that the surface plasmon resonance of copper and silver is comparable in magnitude, and for the gold film is much smaller, which could be a consequence of the higher thickness of the gold film. In addition, we observe how the reflectance curve presents a much slower fall for copper film compared to silver, which makes us think that silver is the most suitable for sensing applications. To compare numerically how appropriate for sensing applications are the metallic thin films we defined the figure of merit S as the ratio between the reflectance drop and the width at half the height of this drop peak:

$$S = \frac{\Delta R}{w} \tag{2}$$

TABLE II. THICKNESS OF METAL FILMS

Metal	Thickness	ΔR	w	S
Au	62.66	41.12	2.05	20.06
	86.22	10.37	1.32	7.86
	135.03	-	-	-
Ag	45.05	82.61	0.33	250.33
	92.79	-	-	-
	117.3	-	-	-
Cu	40.13	95.58	3.51	27.23
	80.55	27.75	1.06	26.18
	106.75	9.26	0.66	14.03

The 45 nm silver thin film presents a figure of merit value of 250, as shown in column S of Table II, which is by far the biggest number and allows us to sustain our claim that silver presents better sensing characteristics than copper and gold.

D. Comparison of experimental and theorical SPR effects on metallic thin films reflectance

The drop in reflectance produced by surface plasmon resonance shown in Fig. 4 for all nine deposited films allowed us to compare the suitability these films have for sensing applications, but we were still interested in knowing how these behaviors match with theoretical values. With this objective we proceeded to plot, in Fig. 5, the theoretical reflectance curves for the thin films that presented visible drops in the reflectance in Fig. 4.

In Fig. 5 we observe the comparison for the 63 nm gold film, the experimental and theoretical curves behave in similar ways, both show drops and increases in reflectance at the same angles. The theoretical reflectance drop was bigger than 70%, but the experimental drop was only 40%, which means that the deposited 63 nm films presented approximately 60% of the theoretical expected reflectance response. These behaviors are similar to the ones observed for the other gold thin film plotted in Fig.5, where in Fig. 5b we observed the experimental gold 86 nm film presenting a 10% reflectance drop, which represents approximately 50% of the theoretical.

For the silver films we compared the 45 nm film as shown in Fig. 5c. The experimental reflectance curve presented a shape that resembles the theoretical shape and a drop to almost 0% reflectance that we also saw in the simulated curve. The biggest difference between the two curves is the stable value before and after the SPR occurs, for the experimental reflectance this value is close to 80%, but the theoretical curve shows a value over 90%, this difference could be attributed to losses in the glass prism and substrate.

In Fig. 5d we present the copper 40 nm film curves, the experimental curve resembled closely the theoretical curve, both have almost identical shapes and showed reflectance drops from over 90% to 0% and then increased to around 65%. In addition, we present copper 81 nm film curves in Fig. 5e and 107 nm curves in Fig. 5f and for these films we observe a discrepancy in the experimental and theoretical curves shape, where the only clear coincidence is the minimum reflectance, being around 65% for the 81 nm film and 85% for the 107 nm film. These differences can be attributed to several factors, one of which is the use of an indirect method to measure the films thicknesses, as it is the case with the fitting model, that can cause discrepancies between the estimated and real thicknesses. This can be solved using atomic force microscopy (AFM). Another factor can be the inhomogeneity of the films, which can present regions of different thickness, and in consequence reflectance, and this may be the reason why the difference is more significant for greater thicknesses. These thickness variations can be reduced by sputter deposition.

Comparing these behaviors, we observed that the films with thickness close to 50 nm have experimental curve shapes and reflectance drops that closer resemble the theoretical curves, and similarities for higher thickness films are smaller.

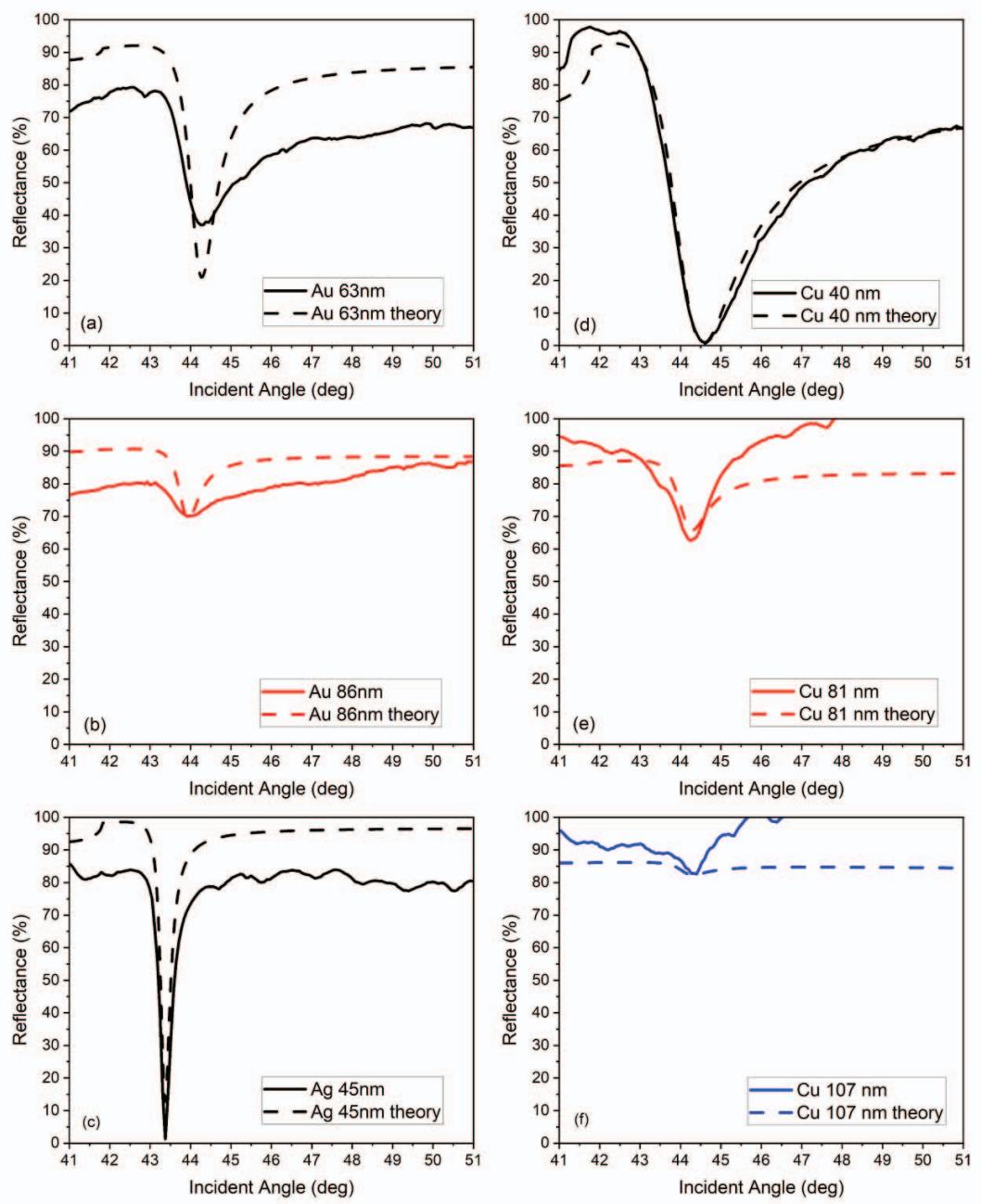


Fig. 5. Comparison of experimental reflectance with simulated theoretical values for the thin films that presented surface plasmon resonance.

E. Sensor properties evaluation

The sensing response was evaluated for the silver 45 nm film, which presented the highest figure of merit value. The film was exposed to ethanol gas at different concentrations to evaluate the sensor properties. First, the ethanol was injected in liquid form in a flask, then evaporated and sent to a chamber of 11.4 cm^3 (at 2 liters per minute) where the film was placed, as shown in Fig. 1. For these measurements, the incident angle was fixed to the minimum of reflectance in an air medium and the reflectance was acquired with time.

The sensing response is presented in Fig. 6. We observe an increase of approximately 3%, 6% and 17%, and a response time of 3, 13, and 30 seconds respectively for 25, 100 and 200 μl of alcohol. It means that reflectance increases with increasing alcohol concentration, and similarly the higher the concentration the longer the response last. In addition, the area under the curves was calculated adding the rectangles form between every consecutive pair of points in the x-axis. We obtained an area of 11.6, 65.5 and 368.0 seconds respectively for 25, 100 and 200 μl of alcohol. This gives us three parameters that can be used to determine the

alcohol concentration from the reflectance reading and ultimately obtain an alcohol sensor characterization. This is of special interest for the food quality analysis of fruits that give off alcohol during decomposition.

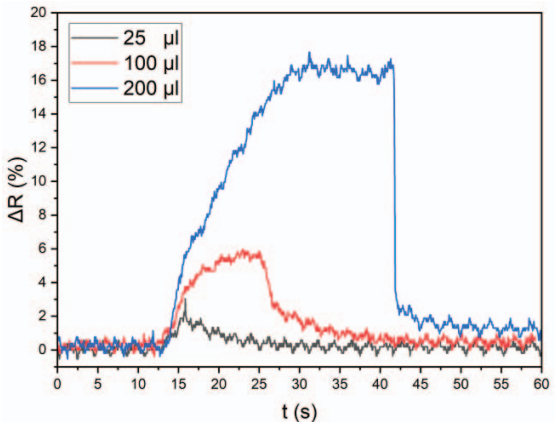


Fig. 6. Sensing response of silver 45 nm film exposed to different alcohol concentrations with a gas flow of 2 liters per minute.

IV. Conclusions

Metallic thin films of gold, silver and copper were deposited by evaporation using three different mass values for each metal. Using UV-visible spectroscopy we measured the transmittance for each film and using a data analysis program we obtained a Drude-Lorentz model that fit the transmittance curves. From the models we obtained the gold, silver and copper permittivities and later compared them with the literature, finding a good resemblance between them. Also, from the models fitting we obtained estimated thicknesses for the deposited films. Using these thicknesses, we simulated the theoretical surface plasmon resonance effects on reflectance and compared them with experimental results. The experimental and theoretical reflectance curves fit very well for thicknesses closer to 50 nm, where these films showed the biggest reflectance drop when the SPR occurred and the silver 45 nm film was the most suitable for sensing applications. This film was then exposed to different concentrations of alcohol at a constant flow gas to evaluate the sensor properties and we found it shows great potential for sensing applications of ethanol. Although silver showed the more promising reflectance drop, it is important to know that gold is highly inert which makes it suitable for many biological and biochemical applications.

The metallic thin films will be further tested in future projects to accomplish the characterization of an alcohol gas sensor for fruit decomposition. The system will also be applied to milk decomposition study, to observe if there is a relationship between the state of decomposition and the SPR responses. Additionally, the system will be tested using multilayer films, looking for improvements in sensing properties by combining the high sensitivity of silver with the inert property of gold as an outside layer.

Acknowledgment

The authors would like to thank to SENACYT for providing funding for this work under the grant FID18-066 and the program SNI Sistema Nacional de Investigación de Panamá, to CEMCIT-AIP for funding administration and Dr. Eleicer Ching for his support during the execution of this work.

References

[1] S. A. Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*, Repr. New York, NY: Springer, 2007, pp 20-34.

[2] A. Axelevitch, B. Gorenstein, and G. Golan, "Investigation of Optical Transmission in Thin Metal Films," *Physics Procedia*, vol. 32, pp. 1–13, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.510.

[3] A. Otto, «Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection», *Z. Physik*, vol. 216, n.º 4, pp. 398-410, ago. 1968, doi: 10.1007/BF01391532.

[4] O. Pluchery, R. Vayron, and K.-M. Van, "Laboratory experiments for exploring the surface plasmon resonance," *Eur. J. Phys.*, vol. 32, no. 2, pp. 585–599, Mar. 2011, doi: 10.1088/0143-0807/32/2/028.

[5] B. Prabowo, A. Purwidyantri, and K.-C. Liu, "Surface Plasmon Resonance Optical Sensor: A Review on Light Source Technology," *Biosensors*, vol. 8, no. 3, p. 80, Aug. 2018, doi: 10.3390/bios8030080.

[6] E. Kretschmann, "Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberfliichenplasmaschwingungen," p. 12.

[7] H. Majeed, J. Alam, and M. S. Anwar, "Angular Interrogation of Surface Plasmon Resonance," p. 14.

[8] Y. Tang, X. Zeng, and J. Liang, "Surface Plasmon Resonance: An Introduction to a Surface Spectroscopy Technique," *J. Chem. Educ.*, vol. 87, no. 7, pp. 742–746, Jul. 2010, doi: 10.1021/ed100186y.

[9] A. B. Kuzmenko, "Kramers–Kronig constrained variational analysis of optical spectra," *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 8, p. 083108, Aug. 2005, doi: 10.1063/1.1979470.

[10] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 22, p. 5271, Aug. 1998, doi: 10.1364/AO.37.005271.

[11] D. Rioux, S. Vallières, S. Besner, P. Muñoz, E. Mazur, and M. Meunier, "An Analytic Model for the Dielectric Function of Au, Ag, and their Alloys," *Advanced Optical Materials*, vol. 2, no. 2, pp. 176–182, Feb. 2014, doi: 10.1002/adom.201300457.

[12] T. Gharbi, D. Barchiesi, S. Kessentini, and R. Maalej, "Fitting optical properties of metals by Drude-Lorentz and partial-fraction models in the [05;6] eV range," *Opt. Mater. Express*, vol. 10, no. 5, p. 1129, May 2020, doi: 10.1364/OME.388060.

[13] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical Constants of the Noble Metals," *Phys. Rev. B*, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379, Dec. 1972, doi: 10.1103/PhysRevB.6.4370.

[14] S. Ekgasit, C. Thammacharoen, F. Yu, and W. Knoll, "Influence of the Metal Film Thickness on the Sensitivity of Surface Plasmon Resonance Biosensors," *Appl Spectrosc*, vol. 59, no. 5, pp. 661–667, May 2005, doi: 10.1366/0003702053945994.

[15] T. T. Ehler and L. J. Noe, "Surface Plasmon Studies of Thin Silver/Gold Bimetallic Films," *Langmuir*, vol. 11, no. 10, pp. 4177–4179, Oct. 1995, doi: 10.1021/la00010a088.

Design and construction of antenna for meteor detection

Diseño y construcción de antena para la detección de meteoros

Salomón Barría A.
Direccion Nacional de Ciencias Espaciales
Universidad Tecnológica de Panamá
Coclé, Panamá
salomon.barria@utp.ac.pa

Joseph Frías G.
Colegio Manuel María Tejada Roca
Ministerio de Educación
Los Santos, Panamá
josfrias4@hotmail.com

Rodney Delgado S.
Direccion Nacional de Ciencias Espaciales
Universidad Tecnológica de Panamá
Coclé, Panamá
rodney.delgado@utp.ac.pa

Manuel Alejandro Chacón
Direccion Nacional de Ciencias Espaciales
Universidad Tecnológica de Panamá
Coclé, Panamá
manuel.chacon@utp.ac.pa

***Abstract*— Projects for the detection, study, and analysis of meteors, as well as other objects, are very limited in Panama. That is why the following work aims to design and build a Yagi antenna at a characteristic frequency of 67 MHz (VHF Band - Channel 4), to detect meteors, using the frontal scattering technique. In the results it has been possible to obtain clear detections of meteoric events, which indicate the correct operation of the system.**

Through this project, the first step is taken to provide the material means and equipment necessary to carry out studies on meteors in Panama. This will develop the basis for a future national meteor monitoring system (SINAMOM).

Keywords*— *Meteor, frequency, wavelength, antenna, coaxial cable, decoder, ionosphere, Doppler effect.

***Resumen*— Los proyectos destinados a la detección, el estudio y el análisis de meteoros, así como de otros objetos, son muy limitados en Panamá. Es por ello por lo que el siguiente trabajo ha tenido como finalidad el diseño y construcción de una antena Yagi en una frecuencia característica de 67 MHz (Banda VHF – Canal 4), para detectar meteoros, utilizando la técnica de dispersión frontal. En los resultados se ha logrado obtener claras detecciones de eventos meteóricos, que indican el correcto funcionamiento del sistema.**

A través del presente proyecto se da el primer paso en brindar el medio material y el equipo necesario para realizar estudios sobre meteoros en Panamá, siendo la base para un futuro sistema nacional de monitoreo de meteoros (SINAMOM).

Palabras clave—Meteoro, frecuencia, longitud de onda, antena, cable coaxial, decodificador, ionósfera, efecto Doppler.

I. INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta está en constante bombardeo de cuerpos provenientes del espacio exterior. Dichos cuerpos pueden ser fragmentos de asteroides, cometas entre otros. Un meteoro es el fenómeno luminoso que se produce por la ionización del aire, cuando los meteoroides son atraídos por la gravedad terrestre y entran en contacto con la atmósfera [1]. Cuando un meteoroide entra al planeta tiene que pasar por las capas de la atmósfera, por lo cual se crea a su alrededor un campo ionizado, a la vez que se desintegra, esto es causado por la resistencia que crean las capas de la atmósfera al movimiento del meteoroide.

Si el meteoro no logra desintegrarse por completo e impacta en la superficie terrestre, al material sobreviviente se le llama meteorito.

El proceso puede durar desde unos pocos segundos hasta minutos.

En la figura 1. se muestra el recorrido completo desde que el meteoroide ingresa a la atmósfera terrestre hasta que el meteorito impacta en la superficie, pasando por el fenómeno de meteoro.

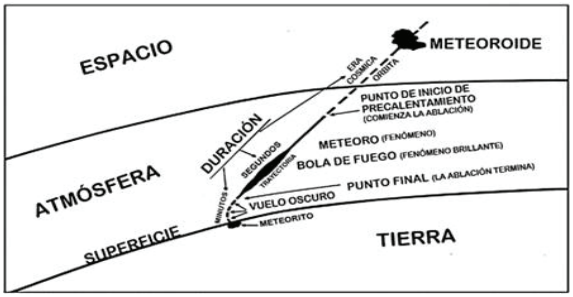


Fig. 1. Ingreso de un meteoroide. Terminología básica para meteoros, desde su ingreso a la atmósfera hasta que caen al suelo [2]. Editado por [3].

La capa ionosférica no tiene la capacidad de reflejar las ondas de radio en frecuencias VHF, salvo durante períodos de máxima actividad solar. De esta manera, algún objeto debe interferir en la ionósfera para que esta tenga la capacidad reflectiva de ondas de radio en frecuencias VHF. Un fenómeno que permite esto son los meteoros.

Podríamos dividir el estudio de meteoros en dos métodos: el método óptico, ya sea utilizando la vista o cámaras fotográficas, y el método de radiofrecuencia, utilizando técnicas de radar o técnicas de dispersión frontal. Para el

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00124

presente proyecto se decidió utilizar el método de dispersión frontal de las ondas de radio.

Si la onda de radio del transmisor alcanza el rastro del meteoro en un ángulo incidente distinto al perpendicular, la señal reflejada se proyectará a algún punto en el suelo a cierta distancia del transmisor. Esto se denomina dispersión frontal [4].

Básicamente, la técnica de dispersión frontal consiste en tener un sistema de recepción que puede estar constituido por una sola antena o varias antenas, separado en un rango de distancia que va de los 500 km a 2000 km de un sistema de transmisión de ondas de radio en frecuencia VHF (very high frequency). Es importante señalar que, para la detección, tanto el sistema de transmisión como el sistema de recepción deben estar sintonizados en la misma frecuencia. La razón por la cual se toma una distancia de separación entre 500 km y 2000 km es para aprovechar la curvatura de la Tierra que evita cualquier recepción directa de señale

En la figura 2. se ilustra la técnica de dispersión frontal aprovechando el paso de un meteoro.

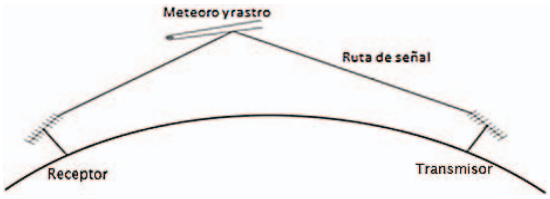


Fig. 2. Propagación y reflexión en un meteoro. Señal de radiofrecuencia desde el transmisor hasta el receptor [5]. Editado por [3].

Gracias a la reflexión en el meteoro, se puede emplear un sistema que detecte esa onda reflejada, la cual lleva la información del fenómeno. Dicho sistema, como se puede observar en la figura 3, constaría de una antena que capte la señal reflejada del meteoro, una línea de transmisión, un decodificador de señales de radio y un sistema de procesado de la información.

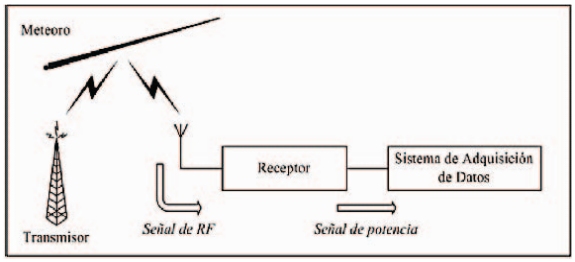


Fig. 3. Sistema de detección. Diagrama de un sistema básico para la detección de mmeteoros a través de la técnica de dispersión frontal [6]. Editado por [3].

Al realizar observaciones de meteoros a una distancia entre transmisor-receptor de aproximadamente un intervalo entre 500 km a 2000 km, muchos eventos pueden interferir al momento de reflejar las señales provenientes de un transmisor de frecuencia VHF. Por ello es importantísimo poder identificar las características propias de cada uno de los eventos, para así diferenciarlos de los meteoros y poder garantizar que, a la hora de hacer las detecciones con el software a utilizar, la señal recibida sea proveniente de dicho fenómeno.

En la figura 4, se presenta, brevemente y de manera ilustrativa, una comparación entre el fenómeno de meteoro y otros eventos.

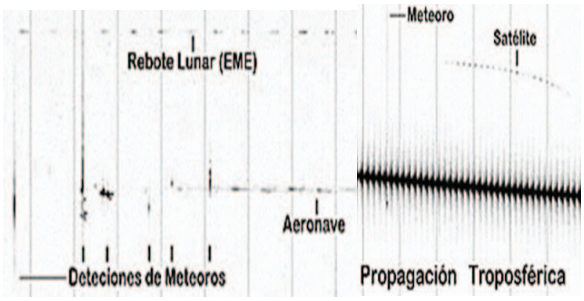


Fig. 4. Comparación de eventos. Diferencia del espectro en cascada de la señal proveniente de meteoros y la proveniente de una aeronave y un satélite, como la Luna (arriba). Abajo, comparativa de un meteoro con un satélite artificial y una dispersión troposférica [7]. Editado por [3].

En nuestro país no contamos con un sistema para la detección de ondas de radio reflejadas en meteoros. Es por ello por lo que se llevó a cabo, el diseño y construcción de una antena para detectar ondas de radio provenientes de la interferencia con meteoros en su ingreso a la ionósfera.

Así, el primer objetivo del presente trabajo fue el diseño y construcción de una antena para la detección de meteoros que entran a la atmósfera terrestre aprovechando las antenas de emisión de radio en VHF. El segundo objetivo fue recolectar datos para verificar el buen funcionamiento del sistema, comparando la regularidad de meteoros en un día con actividad, como la lluvia de meteoros Gemínidas, y una semana regular sin lluvia de meteoros.

En Panamá se quiere detectar meteoros tanto por curiosidad científica como por los nuevos avances que esto representaría en materia de estudios en astronomía.

La importancia del sistema de detección radica en la información recopilada a través de este y que puede servir para futuras investigaciones y proyectos que se quieran realizar, ya que sienta las bases para una red que podría extenderse a diversos puntos del país.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Entendiendo la física del fenómeno de meteoros, las técnicas de detección y los fenómenos que pueden interferir a la hora de detectarlos, se detalla el hardware (equipo) y el software (programa), necesarios para que finalmente la señal que proviene de un meteoro pueda ser detectada y analizada. En este apartado, se enumeran en orden cada uno de los materiales utilizados para el sistema. Esto comprende desde los elementos de la antena hasta los programas utilizados.

2.1 Antena Yagi-Uda

La detección de señales provenientes del fenómeno de meteoros suele darse en gran parte del cielo, por lo que es importante una antena con un patrón de radiación y un área de cobertura amplios. De igual manera, la distancia entre el transmisor y el receptor, utilizando la técnica de dispersión frontal, es muy grande (entre 500 km a 2000 km), por lo que la antena debe tener una buena ganancia para no quedarse corta y detectar señales muy débiles. Finalmente, en un principio se busca utilizar un sistema simple o fácil de construir y de bajo costo.

En general, las antenas Yagi se utilizan para la observación de meteoros.

2.1.1 Diseño de una antena Yagi-Uda

El parámetro inicial que define las dimensiones de una antena Yagi-Uda o de cualquier antena es la frecuencia de trabajo. En este caso, se utiliza como frecuencia de trabajo 67 MHz que representa canal 4 de televisión análoga.

Se utiliza esta frecuencia porque se encuentra en la banda de VHF baja, que es la óptima para observación de meteoros en América [8].

Si tomamos como referencia la distancia del Observatorio Astronómico de Panamá ubicado en Llano Marín, Penonomé, a la sede central de RCN Canal TV, como punto de transmisión con Google Maps, ésta se encuentra a aproximadamente 812 km. La sede de RCN Canal TV se encuentra en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Fig. 5. Distancia de referencia entre transmisor-receptor. Imagen satelital con Google Maps que muestra la distancia medida entre el Observatorio Astronómico de Panamá y RCN Canal TV [3].

A continuación, se muestra el diseño de antena Yagi-Uda, que fue utilizada para la observación por dispersión frontal de los ecos de meteoros.

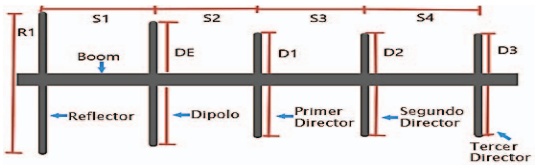


Fig. 6. Diseño de antena Yagi-Uda de 5 elementos. Este diseño se ha hecho en Paint 3D [3].

Ahora se presenta en tablas las dimensiones de cada elemento de la antena tomando en cuenta solo la frecuencia de trabajo de 67 MHz.

TABLA 1. EXPRESIONES DE CÁLCULO DE DIMENSIONES DE LA ANTENA

Elementos	*Ecuación de longitud*	*Ecuación de separación*
Reflector	$R_1 = \frac{150}{f\,(\text{MHz})}$	
Dipolo	$D_E = \frac{142}{f\,(\text{MHz})}$	$S_1 = 0{,}2\ \lambda$
Director 1	$D_1 = \frac{135}{f\,(\text{MHz})}$	$S_2 = 0{,}1\ \lambda$
Director 2	$D_2 = \frac{133}{f\,(\text{MHz})}$	$S_3 = 0{,}18\ \lambda$
Director 3	$D_3 = \frac{129}{f\,(\text{MHz})}$	$S_4 = 0{,}2\ \lambda$

Tabla 1. Expresiones de cálculo de dimensiones de la antena. Ecuaciones preestablecidas que permiten calcular las dimensiones de los elementos y separaciones de una antena Yagi-Uda [3].

2.2. Materiales

Acoplador de impedancia de 300 Ω a 75 Ω, cable coaxial RG-6, dispersor de rayos, conectores y adaptadores.

2.3. Receptor de comunicaciones SDR – play RSP2 PRO

El RSP2 Pro es un receptor SDR (Software Defined Radio), mediante el cual se puede hacer la decodificación de señales analógicas a digital.

Se opta por el RSP2 Pro, porque presenta una buena compatibilidad con diversas plataformas. Posee un amplio rango de trabajo, que va de 1 kHz a 2 GHz, un ancho de banda del espectro de 10 MHz y una cifra de ruido típica de 1,5 dB entre 40 MHz a 100 MHz. Además, cuenta con 10 filtros preseleccionados con selectividad sustancialmente mejorada, incorporados en su diseño interno. Otro punto para tomar en cuenta es su carcasa metálica que asegura un mayor aislamiento de sus componentes internos y por ende de interferencias, que se pueden producir por equipos cercanos.

Fig. 7. Decodificador de señales análogas a digital RSP2pro. (En las imágenes se aprecia las entradas de antena, conexión de alta impedancia, conector para fuente externa y conexión USB para enlazarlo con el ordenador [3].

2.4 Software para monitoreo de señales

Para la configuración del dispositivo SDR como la visualización, recolección y análisis de las señales que se reciben, se necesita el uso de software en un ordenador.

2.4.1 SDR Sharp

Primeramente, se utiliza el software de uso libre SDR Sharp por su sencillez y facilidad, además de ser muy intuitivo a la hora de utilizarlo, compatible mediante una extensión o complemento con el RSP2 Pro.

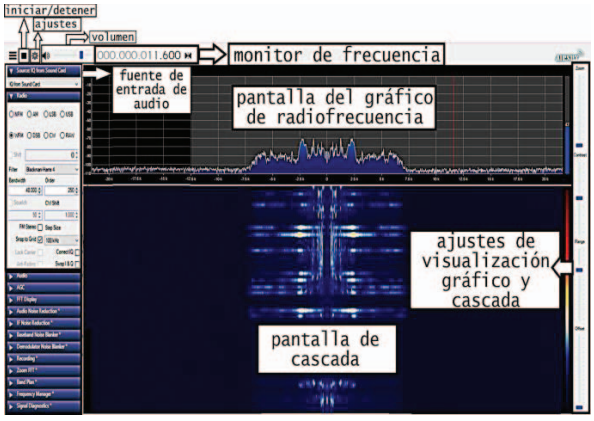


Fig. 8. Interfaz del programa SDR Sharp. Utilizado como monitor de audio para visualizar el comportamiento del espectro de los ecos de meteoros [3].

Una de las desventajas encontradas al utilizar SDR Sharp se presenta al guardar la información. Se utiliza el programa

OBS Studio, para evitar la pérdida de la información, durante la lluvia de meteoros Gemínidas de diciembre de 2018.

2.4.2 HDSDR

Las prestaciones brindadas por este programa son muy similares al mencionado anteriormente.

Este programa resuelve el problema del guardado de la información en archivos que permiten ajustar en tiempo real las grabaciones realizadas. Las aplicaciones típicas son la escucha por radio, uso por radioaficionados, uso en la radioastronomía, análisis de espectro, entre otros.

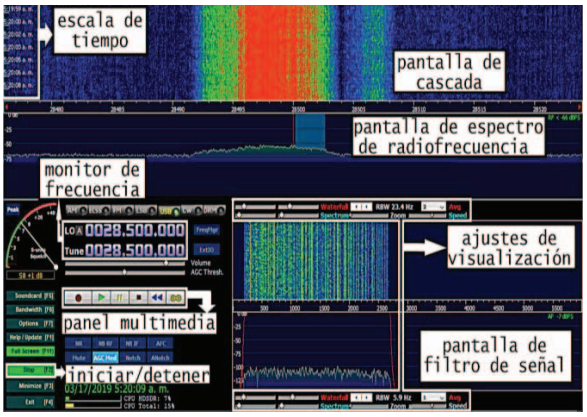


Fig. 9. Interfaz del programa HDSDR. (Utilizado como monitor de audio para visualizar el comportamiento del espectro de los ecos de meteoros [3].

2.4.3 Spectrum Lab

Este software es un poderoso analizador especializado de espectros, filtro, convertidor de frecuencia, registrador de datos, etc. Mediante este programa se puede registrar el comportamiento del espectro de una señal detectada, a través de un monitor de señales como SDR Sharp o HDSDR, por lo que adquiere relevancia en estudios sobre detección de señales provenientes de eventos meteóricos, porque ayuda a construir gráficos de la información registrada, compartirla en tiempo real en la web, entre otras funciones.

Las señales obtenidas se registran al captar el audio proveniente del software de monitoreo de señal (SDR Sharp y HDSDR), mediante la tarjeta de sonido del ordenador.

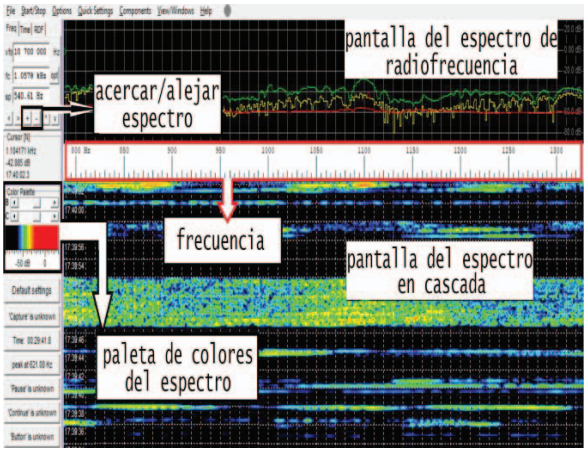


Fig. 10. Interfaz del programa Spectrum Lab. Utilizado para visualizar las señales con mayor detalle, a través de la tarjeta de audio [3].

III. RESULTADOS

Con todo el equipo para el sistema de recepción y detección de ecos de meteoros, se da paso a la construcción - montaje de la antena y demás componentes del sistema.

Posteriormente se visualiza, recolecta y analiza la información durante la lluvia de meteoros Gemínidas de diciembre de 2018 y se compara con una semana de grabación de enero de 2019 donde no se presentaba una actividad de lluvia de meteoros.

3.1 Sistema para la detección de ecos de meteoros

El sistema de recepción consta, en primer lugar, de una antena Yagi-Uda de cinco elementos con dipolo rectangular, sintonizada para 67 MHz.

A continuación, se tiene el resto de los componentes que conforma nuestro sistema de recepción para ecos de meteoros.

Fig. 11. Enlace de cada componente del sistema de detección. (A la izquierda la antena colocada en la parte superior del OAP. En el centro la interconexión del coaxial mediante adaptadores al receptor de comunicaciones RSP2Pro. A la derecha la interconexión entre el RSP2 Pro con el ordenador donde se muestra la interfaz del software utilizado (HDSDR) [3].

3.2 Detección de ecos de meteoros

Una gran cantidad de ecos pueden ser recibidos durante una lluvia de meteoros, con mayor razón cuando la lluvia en cuestión es de las más importantes del año por su tasa promedio por hora. La lluvia de meteoros Gemínidas presenta una tasa aproximada de 80 meteoros a 120 meteoros por hora y se da entre el 7 de diciembre hasta el 16 de diciembre con un máximo el 14 de diciembre.

Por ello, se tomó en cuenta la fecha para poner a prueba el sistema durante los días 13 y 14 de diciembre de 2018, al igual que durante días con menor actividad como el 11, 15 y 16 de enero de 2019.

Las observaciones se realizaron en un ancho de banda de 67,225 MHz a 67,275 MHz, sobre todo en horas de la madrugada a partir de las 12:00AM, hasta el amanecer, a eso de las 6:00AM (hora local).

Durante los días de detección se han recibido ecos con diferentes comportamientos, tales como:

- Ecos puntuales.
- Ecos con desaceleración.
- Ecos con desaceleración y fase estacionaria
- Ecos largos
- Detecciones dudosas y extrañas

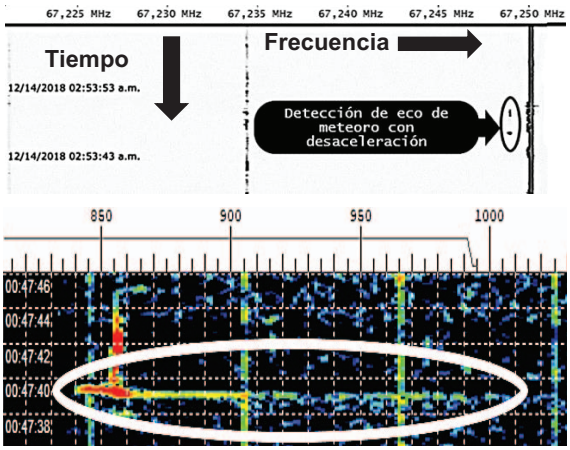
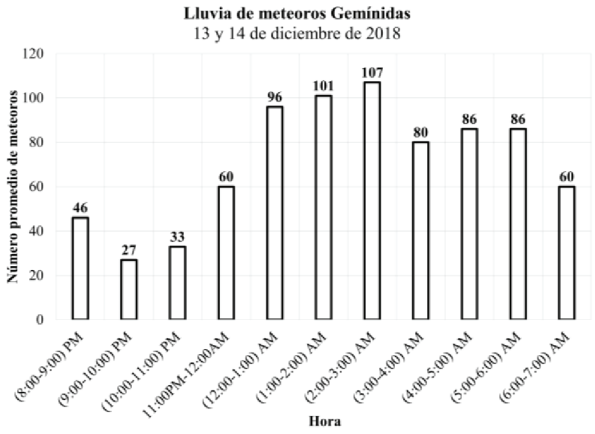


Fig. 12. Ejemplo de eco con desaceleración. Observatorio Astronómico de Panamá (14-12-2018). Ejemplo que muestra una señal con variación de frecuencia de un eco con desaceleración registrada entre 67,245 MHz a 67,250 MHz. Arriba un ejemplo de detección con el sistema, a través del programa SDRSharp y abajo la misma señal, a través del analizador de espectros Spectrum Lab [3].

A partir de la caracterización de los ecos mencionados anteriormente se hizo un conteo visual durante la lluvia de meteoros Gemínidas de 2018, específicamente a partir de las 8:00PM del día 13 de diciembre y durante toda la madrugada del 14 de diciembre (12:00AM – 7:00AM). Para el conteo se ha utilizado un criterio mínimo en el caso de reflexiones simultáneas en todo el ancho de banda. El criterio mínimo utilizado para realizar el conteo de las detecciones consideradas tiene su base, a partir de reflexiones sucesivas que se mostraban en varias partes del ancho de banda del espectro que estaba siendo monitoreado. Cuando esto sucedía se tomaba como una sola detección.

Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 1 (histograma), que representa el conteo realizado en cada intervalo de tiempo correspondiente.



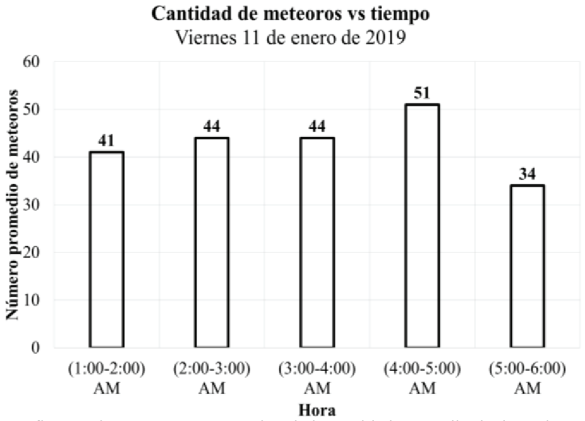
Gráfica 1. Gráfico de lluvia de meteoros Gemínidas. Histograma representativo de la cantidad promedio de detecciones contadas manualmente a través del sistema durante la lluvia de meteoros Gemínidas. Este conteo se realizó a partir de las 8:00PM del 13 de diciembre de 2018 y culminó a las 7:00AM del 14 de diciembre de 2018 [3].

Sobre la base del histograma realizado, se obtuvo a partir de las 8:00PM a 7:00AM de los días 13 y 14 de diciembre de 2018, aproximadamente, un total de 782 detecciones, con un valor pico o máximo promedio de 107 detecciones entre las 2:00AM a 3:00AM. Solo tomando en cuenta el horario de observación para la lluvia de meteoros Gemínidas, se obtiene una tasa nocturna promedio de, aproximadamente, 71 meteoros/hora.

Tomando en cuenta solo la madrugada de observación del día 14 de diciembre, se obtuvo una tasa promedio de 88 meteoros/h.

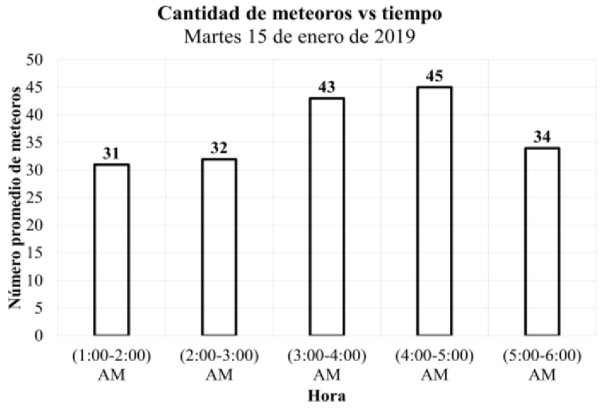
Para contrastar estos resultados, se tomó en cuenta realizar observaciones durante tres días en los cuáles no hubiese actividad de lluvia de meteoros. Esto con el objetivo de verificar una menor actividad en las detecciones obtenidas con el sistema.

En las gráficas 2, 3 y 4, se muestran las detecciones obtenidas a través del conteo visual durante los días 11, 15 y 16 de enero de 2019 entre la 1:00AM a 6:00AM, respectivamente.



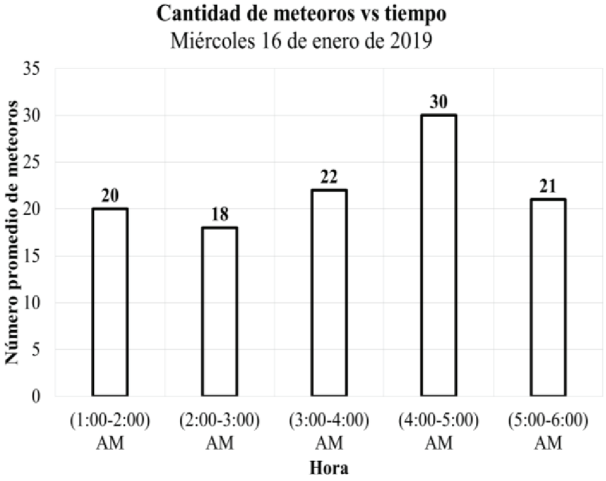
Gráfica 2. Histograma representativo de la cantidad promedio de detecciones contadas manualmente a través de nuestro sistema durante el 11 de enero de 2019. Este conteo se realizó a partir de la 1:00AM y culminó a las 6:00AM [3].

Durante el 11 de enero de 2019 en la madrugada, se tiene un total de 214 detecciones con un valor pico o máximo promedio de 51 detecciones entre las 4:00AM a 5:00AM. Esto representa, tomando en cuenta solo la madrugada de detección, una tasa nocturna promedio de, aproximadamente, 42 meteoros/h.



Gráfica 3. Histograma representativo de la cantidad promedio de detecciones contadas manualmente a través de nuestro sistema durante el 15 de enero de 2019. Este conteo se realizó a partir de la 1:00AM y culminó a las 6:00AM [3].

Durante el 15 de enero de 2019 en la madrugada, se obtuvo un total de 185 detecciones con un valor pico o máximo promedio de 45 detecciones entre las 4:00AM a 5:00AM. Esto representa, tomando en cuenta solo la madrugada de detección una tasa nocturna promedio de, aproximadamente, 37 meteoros/h.



Gráfica 4. Histograma representativo de la cantidad promedio de detecciones contadas manualmente a través de nuestro sistema durante el 16 de enero de 2019. *Este conteo se realizó a partir de la 1:00AM y culminó a las 6:00AM. (Frías & Barría, 2019)*

Durante el 16 de enero de 2019 en la madrugada, se obtuvo un total de 111 detecciones, con un valor pico o máximo promedio de 30 detecciones entre las 4:00AM a 5:00AM. Esto representa, tomando en cuenta solo la madrugada de detección una tasa diaria promedio de aproximadamente 22 meteoros/h.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se plantea la idea de contar con un sistema para la detección de ecos de meteoros a través del Observatorio Astronómico de Panamá. Los resultados reflejan las evidencias de la construcción del sistema que nos permite monitorear señales provenientes de eventos meteóricos.

Según los resultados obtenidos, una antena Yagi de 5 elementos con un dipolo rectangular, en conjunto con el resto de los elementos que componen el sistema, debe garantizar la detección de eventos meteóricos en una ubicación libre al horizonte, apuntando a un transmisor de radiofrecuencia de TV análoga que se encuentra a gran distancia.

Dentro de las señales recibidas en el sistema, se muestran diferentes comportamientos de eventos como ecos puntuales, ecos con desaceleración, ecos con desaceleración y fase estacionaria, y ecos largos. Muchas estaciones de observación han recibido detecciones con comportamientos similares, en otras partes del mundo, a partir de un sistema de bajo costo como este [9].

Al comparar el número de detecciones por hora, se tiene una mayor regularidad de detecciones en la lluvia de meteoros Gemínidas que durante días sin lluvia de meteoros.

Esto representa la primera fase del proyecto liderado por el Observatorio Astronómico de Panamá, con miras a la creación del sistema nacional para el monitoreo de meteoros (SINAMOM).

Finalmente, es importante señalar que una vez se lleve a cabo el apagón analógico de transmisores de TV, para hacer el paso a televisión digital (TDT en frecuencia UHF), se deben ubicar transmisores que envíen una señal en frecuencia VHF para detectar meteoros; de lo contrario se debe crear un sistema de radar propio.

CONCLUSIONES

- En la presente investigación se logró el objetivo de diseñar y construir una antena de tipo Yagi, para la detección de meteoros que entran a la atmósfera terrestre, aprovechando las antenas de transmisión públicas de TV análoga ubicadas a gran distancia.

- Se detectaron señales que presentan claramente el patrón de comportamiento de los ecos de meteoros, sobre todo señales con desaceleración Doppler y fase estacionaria.

- Se logró la prueba del sistema, al contrastar la detección de un día con gran actividad como la lluvia de meteoros Gemínidas y una semana regular de actividad meteórica.

- Debido a las circunstancias del proyecto, el conteo manual de señales es una alternativa, porque representa una gran experiencia que ayuda a comprender mejor el comportamiento de los eventos meteóricos. Una vez obtenida la experiencia, por el tiempo empleado se tiene la capacidad de automatizar el sistema.

- A este trabajo se le puede dar otro enfoque en el tema de seguridad a futuro, tomando en cuenta si se quiere hacer lanzamiento de sondas y satélites de baja altura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] National Geographic. (5 de junio de 2013). *Meteoroides, meteoros y meteoritos*. Obtenido de National Geographic: https://www.nationalgeographic.es/espacio/meteoroides-meteoros-y-meteoritos

[2] Silber, E. A. (s.f.). Observational and Theoretical Investigation of Meteor Infrasound. Obtenido de Physics and Astronomy: http://www.astro.uwo.ca/~esilber/files/01_PhD%20thesis_eas.pdf

[3] Frías, J., & Barría, S. (2019). *Diseño y construcción de antena para la detección de meteoros*. Panamá.

[4] Hankey, LLC, M. (s.f.). *Polarization*. Obtenido de International Meteor Organization: https://www.imo.net/observations/methods/radio-observation/reflection/

[5] Electronics Notes. (s.f.). *Meteor Scatter Communications for Ham Radio*. Obtenido de Electronics Notes: https://www.electronics-notes.com/articles/ham_radio/amateur-propagation/meteor-scatter-burst-communications.php

[6] Picar, A. M. (2 de Julio de 2003). *Radio meteors.* Obtenido de The SAO/NASA Astrophysics Data System: http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?letter=.&classic=YES&bibcode=2003JIMO...31..139M&page=&type=SCREEN_VIEW&data_type=PDF_LOW&send=OBTENER+&filetype=.pdf

[7] Norman Lockyer Observatory. (s.f.). *Meteor Detection*. Obtenido de Norman Lockyer Observatory: http://normanlockyer.com/the-observatory/lockyer-technology-centre/meteor-detection/

[8] The American Meteor Society. (diciembre de 1996). *The American Meteor Society*. Obtenido de Amsmeteors: https://www.amsmeteors.org/radio/ams203.txt

[9] Morgan, D. (2012). *Meteor Radar in the UK using the BRAMS Transmitter in Belgium*. Obtenido de The British Astronomical Association: https://www.britastro.org/radio/projects/BRAMS_Meteor_Radar.pdf

Optical properties of $BiFeO_3$: a theoretical and experimental approach

Eleicer Ching-Prado
Laboratorio Pierre & Marie Curie,
Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá,
Ciudad de Panamá, Panamá,
eleicer.ching@utp.ac.pa

abstract- Theoretical $BiFeO_3$ (BFO) single crystal with R3c rhombohedral phase was studied using PBEsol and Heyd–Scuseria–Ernzerhof (HSE) exchange-correlational functional and the optimized norm-conserving Vanderbilt (ONCV) pseudopotentials. The electronic band structure was determinate, and the results indicate a direct band gap out of the Brillouin zone center (k=Z). The UV-Visible optical response corresponds to electronic interband transition from O2p slightly hybridized with Fe3d in the valence band to Fe3d slightly hybridized with O2p and Bi6p in the conduction band. Finally, the theoretical complex dielectric function and the Brillouin zone center optical phonons results are compared with those experimentally reported in the literature.

Key words: **$BiFeO_3$,** ***band gap, optical parameters, optical phonon, complex dielectric function, DFT.***

Resumen **El monocristal teórico de BiFeO3 (BFO) con fase romboédrica R3c se estudió utilizando los funcionales de intercambio y correlación PBEsol y Heyd-Scuseria-Ernzerhof (HSE), y los pseudopotenciales optimizados de Vanderbilt (ONCV). Se determinó la estructura de la banda electrónica y los resultados indican una banda prohibida directa fuera del centro de la zona de Brillouin (k=Z). La respuesta óptica UV-Visible corresponde a la transición electrónica entre bandas de O2p ligeramente hibridado con Fe3d en la banda de valencia y bandas Fe3d ligeramente hibridado con O2p y Bi6p en la banda de conducción. Finalmente, los resultados teóricos de la función dieléctrica compleja y los fonones ópticos en el centro de la zona de Brillouin se comparan con los reportados experimentalmente en la literatura.**

Palabras clave: BiFeO3, banda prohibida, parámetros ópticos, fonón óptico, función dieléctrica compleja, DFT.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a sus propiedades ferroeléctricas, magnéticas y piezoeléctricas a temperatura ambiente, el BFO es uno de los materiales multiferroicos más estudiados dado su gran potencial como candidato para diferentes aplicaciones tecnológicas, como recolección de energía, detección de gases, memoria no volátil, espintrónica, y óptica no lineal [1, 2]. BFO es bien conocido por tener una estructura de perovskita distorsionada romboédrica con un grupo espacial R3c y una gran polarización a lo largo de la dirección [111] [3]. Algunas controversias han existido en este material en relación con el tipo de banda prohibida, directa o indirecta; además de la falta de una clara definición de las representaciones irreducibles de los fonones ópticos [4, 5, 6]. Así, se necesita mucho trabajo de investigación para comprender las propiedades físicas básicas del BFO, y hacer posible su uso tecnológicamente.

Para las múltiples aplicaciones tecnológicas, se requiere el crecimiento de BFO en películas delgadas. Por lo tanto, una película de BFO experimenta tensión o compresión que surge del desajuste con el sustrato (diferentes tamaños de celdas y coeficientes de expansión). También se sabe que la deformación puede ser controlada por el tipo de sustrato, el espesor de la película y el campo eléctrico, entre otros parámetros [7, 8].

En este artículo, cálculos DFT de un cristal romboédrico de BFO fueron realizados utilizando funcionales de correlación e intercambio PBEsol y HSE, y pseudopotenciales ONCV, para determinar la estructura de banda electrónica, la densidad de estados, la distribución de carga, los fonones ópticos en el centro de la zona de Brillouin, y la función dieléctrica compleja. Se prestó especial atención a la comparación de los resultados teóricos con sus similares experimentales.

II. CÁLCULO COMPUTACIONAL DFT

El estudio teórico se llevó a cabo a través de un enfoque de primeros principios DFT implementado dentro del código computacional Quantum Espresso (QE) [9]. Se adopta inicialmente el funcional híbrido Heyd-Scuseria-Ehrenzof (HSE), para una mejor descripción de las interacciones de intercambio y

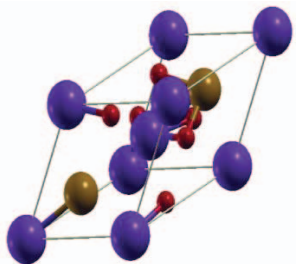


Figura 1: Estructura romboedro R3c de BFO. Violeta Bi, chocolate Fe, y rojo O.

Proyecto FID2021-55 SENACyT

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00125

correlación, para los cálculos de la estructura de banda electrónica, la densidad de estados, y la distribución de carga. La función de onda de los electrones se expandió en ondas planas a una energía de corte de 80 Ry. El umbral de convergencia energética para el campo auto-consistente (SCF) fue $1x10^{-6}$ Ry. Se utilizó una celda de geometría experimental R3c de BFO con parámetro de red de 5.63676Å y ángulo de 59.424° [10], ver Figura 1. Las posiciones de los átomos en la estructura se muestran en la tabla 1.

También se utilizó el funcional Perdew-Burke-Ernzerhof sólido (PBEsol) para el cálculo de los fonones ópticos en el centro de la zona de Brillouin, con una malla Monkhorst-Pack de 3x3x3 para la integración en la zona de Brillouin. Para cualquiera de los dos funcionales se usaron los pseudopotenciales ONCV [11]. Las configuraciones electrónicas de valencia fueron $5d^{10}6s^26p^3$ para Bi, $3s^23p^63d^64s^2$ para Fe, y $2s^22p^4$ para O. El código Yambo fue utilizado para calcular las propiedades ópticas usando los resultados SCF obtenidos por HSE-QE [12].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la estructura de banda electrónica de intrínseco BFO obtenida por DFT utilizando el funcional de intercambio y correlación hibrido HSE. Una banda prohibida directa fue obtenida en el punto k=Z del espacio reciproco, y cuyo valor fue de 2.65 eV. Un resultado similar fue obtenido con el funcional PBEsol, en relación con una descripción de banda prohibida directa, sin embargo, su valor fue de alrededor de 0.9 eV, el cual es de baja estimación, como es conocido de los funcionales GGA para semiconductores, con respecto a los 2.5-2.7 eV encontrados experimentalmente. De modo que, frente a la controversia si la banda prohibida del BFO es directa o indirecta [6], los resultados del presente trabajo indican que es directa.

La estructura de banda electrónica está referenciada respecto al nivel de Fermi (E_f), el cual se encuentra dentro de la banda prohibida con un valor de 11.3548 eV. En la Figura 2, también se puede observar que la banda de valencia es mucho más densa que la banda de conducción. Además, cabe señalar, que el cálculo SCF indicó un material anti ferromagnético, en concordancia con lo reportado [1,2,8], con magnetización absoluta de 8.81 μ_B/celda y energía del estado base igual a -1016.86163 Ry.

La Figura 3 presenta la densidad de estados (DOS) total junto con las principales contribuciones parciales de los orbitales de los diferentes átomos del BFO. Note que, en la banda de valencia, entre 0 y -4 eV la mayor contribución a DOS provienen de los orbitales O2p, aunque de 0 a cerca de 2 eV también participan los orbitales Fe3d, por lo que se tiene una ligera hibridación en esta región. Para energía menores a -4 eV una fuerte hibridación es observada entre O2p, Fe3d y con menor contribución Bi6p. Por otro lado, comenzando la banda

Tabla 1: Posiciones atómicas encontradas experimentalmente en la geometría R3c del BFO. Todas las coordenadas están en angstrom (Å).

Bi(1)	0.000000	0.000000	0.000000
Bi(2)	0.000000	0.000000	6.933500
Fe(1)	0.000000	0.000000	3.067381
Fe(2)	0.000000	0.000000	10.000881
O(1)	-1.522621	-0.472609	8.610945
O(2)	1.170602	-1.082324	8.610945
O(3)	0.352019	1.554933	8.610945
O(4)	-1.170602	2.143679	6.299778
O(5)	2.441782	-0.058068	6.299778
O(6)	-1.271179	-2.085611	6.299778

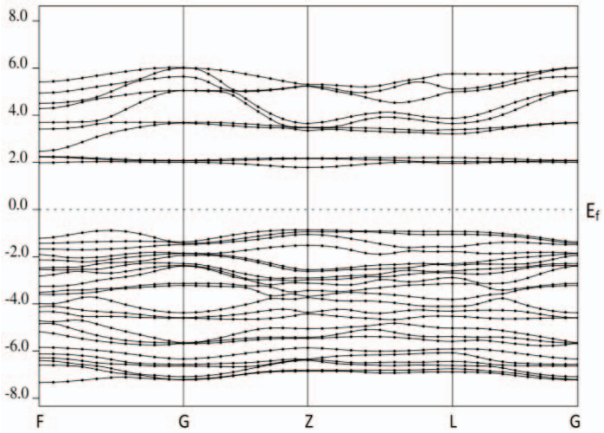


Figura 2: Estructura de Banda Electrónica de BFO con simetría R3c. La línea punteada en energía cero, corresponde al nivel de Fermi.

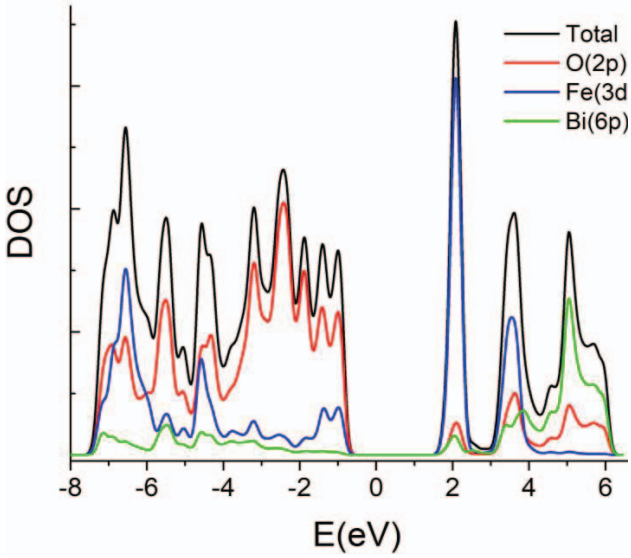


Figura 3: DOS parciales y total de los orbitales atómicos de la estructura R3c de BFO.

de conducción y alrededor de 2 eV una intensa banda DOS puede ser apreciada con la mayor contribución proveniente de los orbitales Fe3d hibridada muy ligeramente con los orbitales O2p y Bi6p. Para valores de energía entre 3 y 4 eV, hibridación entre los orbitales O2p, Fe3d y Bi6p son claramente observadas, siendo los Fe3d los de mayor contribución. Mientras que de 4 a 6 eV la hibridación se lleva a cabo entre los orbitales Bi6p y O2p, donde el primero es el de mayor contribución.

La tabla 2 muestra el análisis de población atómica de Löwdin realizado a la estructura experimental R3c de BFO. Esto proporciona una estimación cuantitativa de la transferencia de electrones entre los átomos metálicos de Bi y Fe con los átomos de oxígeno. Note, que la carga total del Bi y Fe son menores que sus electrones de valencias 15 y 16, respectivamente. Por lo tanto, esta diferencia corresponde a la carga transferida a los oxígenos, lo cual parece indicar que los enlaces Bi-O y Fe-O tienen un carácter covalente.

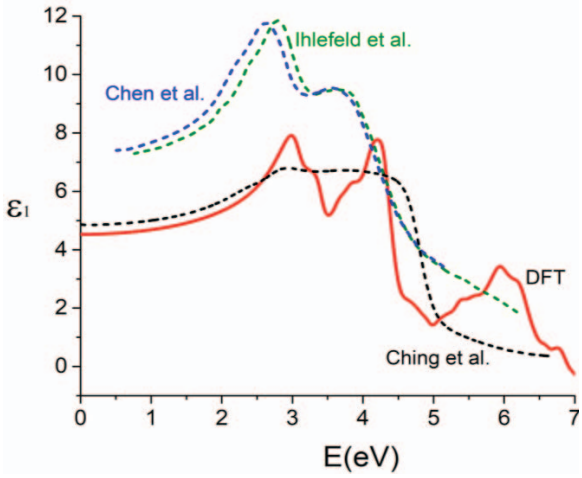


Figura 4: Parte real de la función dieléctrica de BFO por DFT. Se incluyen resultados experimentales para una comparación [13-15].

La función dieléctrica compleja (ε) de un material describe las propiedades eléctricas y ópticas cuando interactúa con una onda electromagnética. En particular, la parte imaginaria de la función dieléctrica (ε_2) representa el comportamiento de absorción óptica. Así, el código Yambo sobre el resultado SCF junto con los pseudopotenciales ONCV han permitido calcular las propiedades ópticas. La aproximación de fase aleatoria (RPA) dentro de un enfoque de partículas independientes (IP) se ha usado para describir la respuesta óptica de la estructura R3c de BFO. Las Figuras 4 y 5 presentan la parte real e imaginaria de la función dieléctrica (ε_1 y ε_2) obtenido por DFT-Yambo, donde se comparan con los resultados experimentales encontrados por Chen et al. [13], Ihlefeld et al. [14], y Ching et al. [15] en películas delgadas de BFO sobre substratos de $YAlO_3$, $SrTiO_3$, y vidrio, respectivamente. Note, la buena concordancia entre los resultados experimentales y los teóricos,

Tabla 2: Distribución de carga de electrones de la geometría experimental R3c del BFO cuantificada por las poblaciones atómicas de Löwdin utilizando el funcional HSE.

Átomos	Carga total (e)	Carga total transferida (e)	Carga parcial (e)		
			s	p	d
Bi(1)	13.5915	1.4085	1.8814	1.7134	9.996
Bi(2)	13.5925	1.4075	1.8813	1.7143	9.996
Fe(1)	14.3691	1.6309	2.4996	5.9977	5.871
Fe(2)	14.3694	1.6306	2.4996	5.9977	5.872
O(1)	6.9156	-0.9156	1.8569	5.0587	-
O(2)	6.9395	-0.9395	1.8501	5.0894	-
O(3)	6.9327	-0.9327	1.8509	5.0818	-
O(4)	6.9186	-0.9186	1.8571	5.0615	-
O(5)	6.9363	-0.9363	1.8505	5.0858	-
O(6)	6.9325	-0.9325	1.8504	5.0822	-

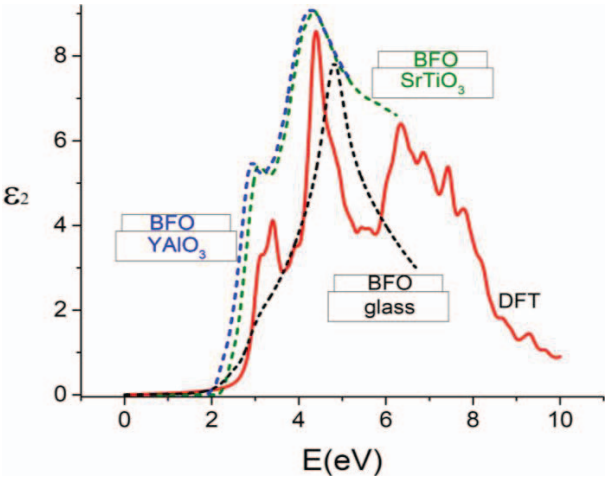


Figura 5: Parte imaginaria de la función dieléctrica de BFO por DFT. Se incluyen resultados experimentales para una comparación [13-15].

particularmente las bandas ε_2 alrededor de 3 y 4.4 eV. Una revisión de la densidad de estados (DOS) revela rápidamente que la banda ε_2 cerca de 3 eV debe provenir de la transición de electrones desde la banda DOS en -1 eV (banda de valencia) hacia la intensa banda DOS en 2 eV (banda de conducción). Mientras que la banda ε_2 en 4.4 eV, debe ser una transición de la banda DOS desde -2.4 eV en la banda de valencia hacia la misma banda intensa en 2 eV en la banda de conducción. En ambos casos, los resultados indican que provienen de transiciones electrónicas entre los orbitales O2p ligeramente hibridado con los orbitales Fe3d en la banda de valencia, y los orbitales Fe3d ligeramente hibridado con los orbitales O2p y Bi6p en la banda de conducción. Los substratos utilizados por Chen et al. [13] e Ihlefeld et al. [14], son perovskitas con similares parámetros de red que el BFO, quien pertenece prácticamente a la misma familia. Por lo tanto, es de esperarse

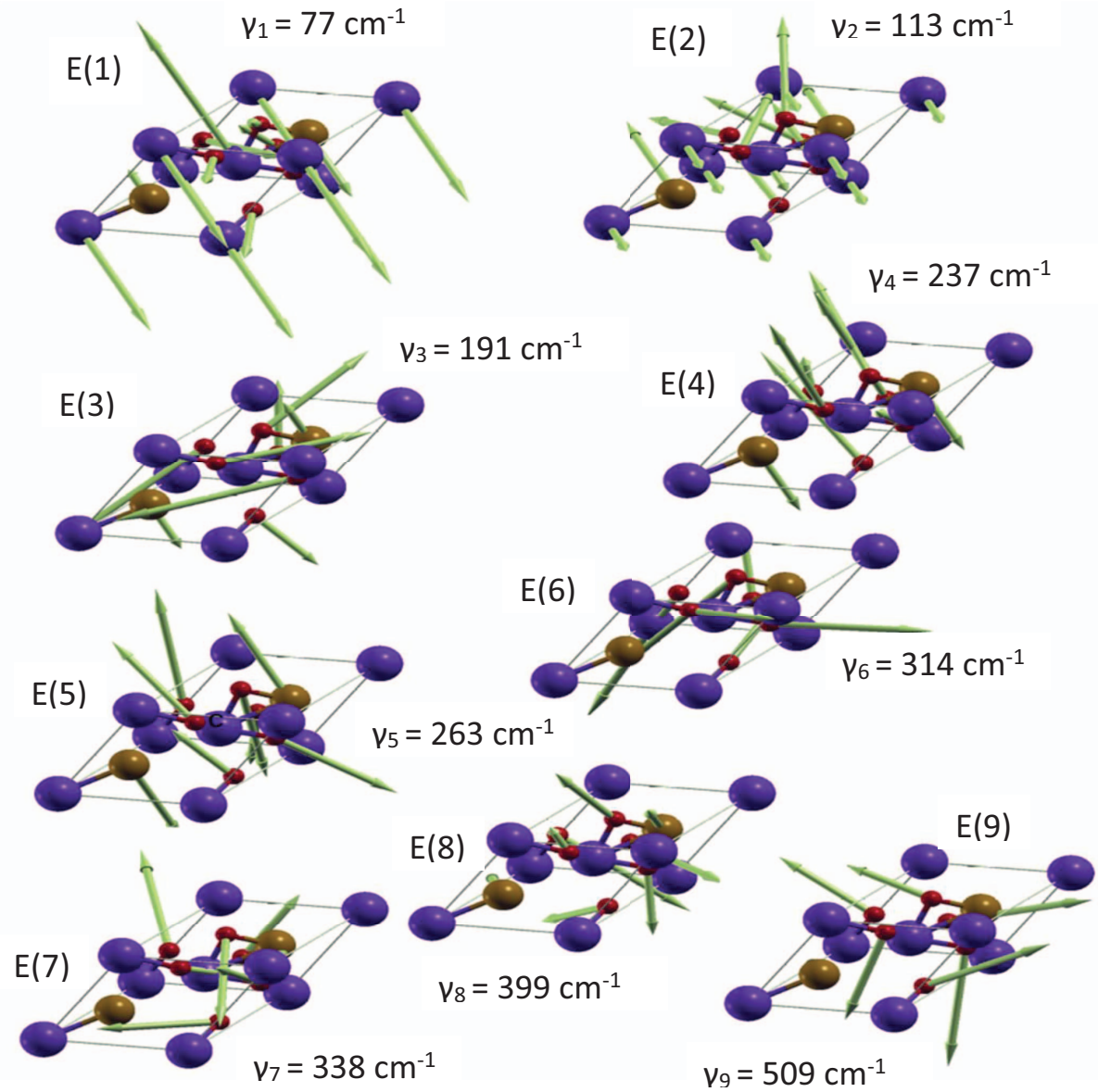


Figura 6: Modos ópticos con representación irreducible E en el cristal romboédrico BFO. La flecha indica el movimiento de los átomos involucrados en la vibración. Se incluyen las frecuencias de todos los modos E. La relación de los colores con los átomos es como sigue: Violeta Bi, chocolate Fe, y rojo O.

un bajo estrés en la interfaz, no así en el BFO con substrato de vidrio utilizado por Ching et al. [15]. De modo que, un alto estrés parece explicar el corrimiento de la banda ε_2 hacia 4.8 eV en la muestra de Ching et al. [15]. Sin embargo, según Chen et al. esto podría deberse a cambio de geometría romboedro R3c a una simetría tetragonal P4mm debido al estrés. Esto último, será motivo de investigación por DFT próximamente. También las comparaciones permiten decir que el ancho de las bandas parece estar asociado con el grado de cristalización de las muestras, siendo las bandas de menor ancho las muestras mejor cristalizadas. Este hecho fue comprobado por Ching et al. [15] en una comparación con una muestra amorfa de BFO sobre

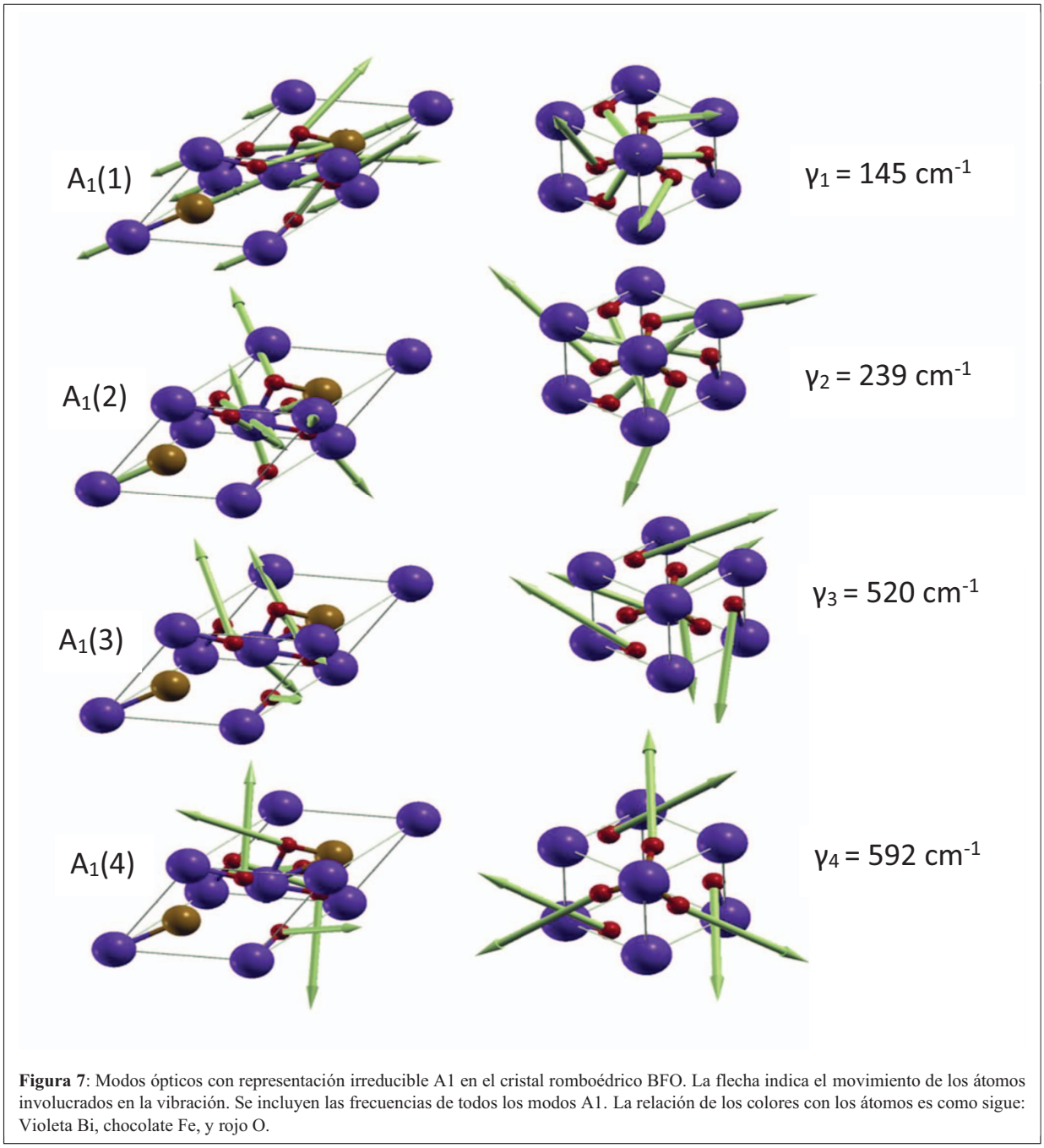


Figura 7: Modos ópticos con representación irreducible A1 en el cristal romboédrico BFO. La flecha indica el movimiento de los átomos involucrados en la vibración. Se incluyen las frecuencias de todos los modos A1. La relación de los colores con los átomos es como sigue: Violeta Bi, chocolate Fe, y rojo O.

substrato de aluminio. Por otro lado, de la forma del espectro de ε_1 asociado a los anchos de las bandas se percibe una mejor descripción de la cristalización, siendo la muestra de BFO/vidrio la de menor cristalización.

Como se ha mencionado, el BFO exhibe una estructura cristalina romboédrica con el grupo espacial R3c. Hay dos unidades químicas de BFO dentro de la celda unitaria romboédrica, que corresponde a diez átomos. Por lo tanto, se esperan 30 modos de vibración en el centro de la zona de Brillouin. Ellos se pueden agrupar en la siguiente representación irreducible: τ= 5A1 + 5A2 + 10E, donde los modos E están doblemente degenerados. Tres de estos fonones son modos acústicos, con dos de representación E y uno de representación A1. Así, los 27 modos ópticos se pueden expresar en τ= 4A1 + 5A2 + 9E. Como los modos A2 son

silenciosos, en la zona centro se pueden agrupar los modos activos Raman e IR en $\tau = 4A1 + 9E$ [13].

Utilizando la teoría de perturbación sobre los resultados de SCF con el funcional PBEsol se calcularon los modos ópticos. La tabla 3 presenta los fonones ópticos encontrados junto con su representación irreducible, además se comparan con otros resultados teóricos y experimentales, obteniéndose una buena

Tabla 3: Modos ópticos de BFO calculados por DFT. Además, se incluyen los modos ópticos reportados en la literatura. Las frecuencias están en cm^{-1} y los modos se indican con sus representaciones irreducibles A1 y E según cada autor. Ref. [5, 15,16, 17]

Este Trabajo Teo.-DFT	Ching Exp.	Tütüncü Teo.	Kothari Exp.	Beekman Exp.
77 (E)	70.5	-	77.36 (E)	-
113 (E)	128.5	95.6 (E)	98.36 (E)	-
145 (A1)	148.4	163.9 (A1)	135.15 (A1)	140 (E)
192 (E)	174.2	168.0 (E)	167.08 (A1)	173 (E)
237 (E)	220.8	209.1 (E)	218.11 (A1)	220 (E)
239 (A1)	264.9	239.5 (E)	255.38 (E)	265 (A1)
263 (E)	285.5	288 (A1)	283.0 (E)	288 (E)
-	-	305.6 (E)	-	-
314 (E)	319.4	316.3 (A1)	321.47 (E)	-
338 (E)	358.1	358 (E)	351.55 (E)	350 (A1)
-	374.8	374 (E)	-	371(E)
-	412.5	-	-	-
398 (E)	440.4	398.4 (E)	430.95 (A1)	-
509 (E)	482.8	-	467.6 (E)	471 (E)
520 (A1)	550.7	514 (E)	526.22 (E)	520 (A1)
592 (A1)	581.5	514 (A1)	598.84 (E)	550 (E)

concordancia con las frecuencias de los modos. La sobreestimación y la subestimación de las frecuencias de los fonones, al comparar los resultados DFT con los experimentales, puede deberse a la sobreestimación sistemática de las energías de enlace atómico, la cual es inherente a los cálculos de DFT. Por lo tanto, esto conduce a inexactitudes en la estimación de las frecuencias propias de los modos [18].

Las Figuras 6 y 7 muestran los 9 modos de representación E y los 4 modos de representación A1, respectivamente. En este último, se presenta además la visión a través de la dirección [111].

IV. CONCLUSIÓN

Un estudio DFT ha sido realizado al cristal romboédrico $BiFeO_3$, donde el funcional híbrido HSE fue utilizado para la estructura de bandas electrónicas, la densidad de estados y los cálculos de propiedades ópticas. Mientras el funcional PBEsol se utilizó para la obtención de los fonones ópticos. Todos los cálculos se realizaron a través de los pseudopotenciales ONCV. Este enfoque muestra que los resultados teóricos describen relativamente bien los resultados experimentales. La estructura de banda electrónica indica una banda prohibida directa con valor de 2.65 eV. La distribución de carga parece indicar que los enlaces Bi-O y Fe-O tienen un carácter covalente, dada las transferencias de cargas encontradas. Esto también puede ser sustentado por las hibridaciones halladas entre Bi, Fe y O.

Las funciones dieléctricas ε_1 y ε_2 han sido determinadas, donde dos bandas ε_2 cerca de 3 y 4.4 eV están asociadas a transiciones desde los orbitales O2p ligeramente hibridado con los orbitales Fe3d en la banda de valencia, a los orbitales Fe3d ligeramente hibridado con los orbitales O2p y Bi6p en la banda de conducción. Estas funciones también brindan información del grado de cristalinidad del BFO. Por último, se describen los 13 fonones ópticos en el centro de la zona de Brillouin con sus respectivas representaciones irreducibles.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de investigación ha sido financiado parcialmente por el proyecto de SENACyT FID2021-55. Quiero agradecer a Hannah Fernández por el apoyo en el proceso de digitalización. También quiero agradecer al Sistema Nacional de Investigación de Panamá (SNI) por apoyarme.

REFERENCIAS

[1] A. Talkenberger, I. Vrejoiu, F. Johann, C. Röder, G. Irmer, D. Rafaja, G. Schreiber, J. Kortus, and C. Himcinschi, Raman spectroscopic investigations of epitaxial $BiFeO_3$ thin films on rare earth scandate substrates, J. Raman Spectrosc. 46 (2015), 1245–1254.

[2] G. Clarke, A. Rogov, S. McCarthy, L. Bonacina, Y. Gun'ko, C. Galez, R. Dantec, Y. Volkov, Y. Mugnier, and A. Prina-Mello, Preparation from a revisited wet chemical route of phase-pure, monocrystalline, and SHG-efficient $BiFeO_3$ nanoparticles for harmonic bio-imaging, Scientific Reports | *(2018) 8:10473* | DOI:10.1038/s41598-018-28557-w.

[3] Y.C. Hu, Z.Z. Jiang, K.G. Gao, G.F. Cheng, J.J. Ge, X.M. Lv, X.S. Wu, Chemical Physics Letters 534 (2012) 62–66.

[4] R. Palai, H. S. Schmid and R. S. Katiyar, "Polarized Raman scattering of multiferroic BiFeO3 single domian crystal and thin film," *2008 17th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics*, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISAF.2008.4693780.

[5] H. M. Tütüncü, and G. P. Srivastava, Electronic structure and zone-center phonon modes in multiferroic bulk $BiFeO_3$, Journal of Applied Physics 103, 083712 (2008).

[6] Hafiz Abdul Ali Khan et al., First principle study of band gap nature, spontaneous polarization, hyperfine field and electric field gradient of desirable multiferroic bismuth ferrite (BiFeO3), Journal of Physics and Chemistry of Solids 148 (2021).

[7] Z. Duan, K. Jiang, J. Wu, J. Sun, Z. Hu, J. Chu, Thickness-dependent optical properties in compressively strained $BiFeO_3/LaAlO_3$ films grown by pulsed laser deposition, Materials Research Bulletin 51 (2014) 351–355.

[8] C. Gumiel, and D. G. Calatayud, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Thin film processing of multiferroic BiFeO3: From sophistication to simplicity. A review, doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.08.002 (2021).

[9] Giannozzi, P. *et al.* QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *J. Phys. Condens. Matter,* **21,** 395502 (2009).

[10] Moreau J, Michel C, Gerson R, James W, Ferroelectric BiFeO3 X-Ray and neutron diffraction study, Journal of Physics and Chemistry of Solids 32 (1971) 1315-1320.

[11] Schlipf M., Gygi F., Optimization algorithm for the generation of ONCV pseudopotentials, Computer Physics Communications, 196, 36-44 (2015).

[12] Marini A., Hogan C., Grüning M., and Varsano D., Yambo: an *ab initio* tool for excited-state calculations, *Comp. Phys. Comm*., 180, 1392 (2009).

[13] P. Chen, N. J. Podraza, X. S. Xu, A. Melville, E. Vlahos, V. Gopalan, R. Ramesh, D. G. Schlom, and J. L. Musfeldt, Optical properties of quasi-tetragonal BiFeO 3 thin films, Applied Physics Letters 96, 131907 (2010).

[14] J. F. Ihlefeld, N. J. Podraza, Z. Liu, R. C. Rai, X. Xu, T. Heeg, Y. Chen, J. Li, R. W. Collins, J. L. Musfeldt, Optical band gap of BiFeO3 grown by molecular-beam epitaxy, Applied Physics Letters 92, 142908 _2008).

[15] E. Ching-Prado, H. Miranda, E. de Obaldía, Structural and Optical Properties of $BiFeO_3$ Thin Films, sometido a Ferroelectrics 2022.

[16] D. Kothari, V. Reddy, V.G. Sathe, A. Gupta, A. Banerjee, A.M. Awasthi, Raman scattering study of polycrystalline magnetoelectric $BiFeO_3$, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008) 548–552.

[17] C. Beekman, A. A. Reijnders, Y. S. Oh, S. W. Cheong, and K. S. Burch, Raman study of the phonon symmetries in $BiFeO_3$ single crystals, Physical Review B 86, 020403(R) (2012).

[18] Braïda, B.; Hiberty, P.C.; Savin, A.A. Systematic Failing of Current Density Functionals: Overestimation of Two-Center Three-Electron Bonding Energies. *J. Phys. Chem. A* (1998), *102*, 7872–7877.

Crashworthiness behavior of thin-walled bioinspired structures in the coconut palm

Comportamiento ante la colisión de estructuras de pared delgada bioinspiradas en la palma de coco

Estephany Reyes
School of Traffic and Transportation Engineering
Central South University
Changsha, China
estephany.reyes@utp.ac.pa

Nacarí Marín
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
nacari.marin@utp.ac.pa

Kui Wang
School of Traffic and Transportation Engineering
Central South University
Changsha, China
kui.wang@csu.edu.cn

***Abstract*— Bioinspired design has been addressed in the literature to create new structures based on the analysis of mechanical properties of living organisms, particularly this research is bioinspired in the structure, properties, and anatomy of the coconut palm (Cocos nucifera) present in the Panamanian vegetation.

In this research, twelve thin-walled structures with cylindrical and square shapes were designed and modeled through the finite element method based on previous research. Collision behavior was evaluated by numerical simulation using Abaqus/CAE 2017 software. The performance of the bio-inspired models is evaluated based on five collision resistance criteria, these are energy absorption (EA), specific energy absorption (SEA), mean crushing force (MCF), maximum crushing force (PCF) and crushing force efficiency (CFE). The test methodology is under dynamic axial crushing load and oblique crushing load for angles from 5° to 30° with increments every 5°.

Of the bio-inspired models, two models with cylindrical shape (CG-1 and CG2-1) and two models with square shape (SG1-2 and SG2-1) gave the best results with respect to the conventional hollow structure. It should be noted that better performance was obtained with models whose geometry has a cylindrical shape and has an internal design that includes arches. Finally, although they are not the best in comparison with other designs in the literature, do have the potential to be used as energy absorbing structures.

***Keywords*— axial crushing, bio-inspired design, crashworthiness, coconut palm, energy absorption, oblique impact.**

***Resumen* —** El diseño bioinspirado ha sido abordado en la literatura con el objetivo de crear nuevas estructuras en base al análisis de propiedades mecánicas de organismos vivos, particularmente esta investigación es bioinspirada en la estructura, propiedades y anatomía de la palma de coco (Cocos nucifera) presente en la vegetación panameña.

En esta investigación se diseñaron doce estructuras de pared delgada con geometría cilíndrica y geometría prismática cuadrangular, las que fueron modeladas a través del método de elementos finitos en base a investigaciones previas. Se evaluó el comportamiento en caso de colisión mediante simulación numérica utilizando el software Abaqus/CAE 2017. El rendimiento de los modelos bioinspirados es evaluado en base a cinco criterios de resistencia a la colisión, estos son absorción de energía (EA), absorción de energía específica (SEA), fuerza media de aplastamiento (MCF), fuerza máxima de aplastamiento (PCF) y eficacia de la fuerza de aplastamiento (CFE). La metodología de los ensayos es bajo carga dinámica de aplastamiento axial y carga de aplastamiento oblicuo para ángulos de 5° a 30° con incremento cada 5°.

De los modelos bioinspirados hay dos modelos con geometría cilíndrica (CG-1 y CG2-1) y dos modelos con geometría prismática cuadrangular (SG1-2 y SG2-1) que dieron los mejores resultados con respecto a la estructura convencional. Cabe destacar que se obtuvo un mejor rendimiento con los modelos cuya geometría es cilíndrica y tiene un diseño interno que incluye arcos. Por último, aunque no son los mejores en comparación con otros diseños de la literatura, tienen el potencial de ser utilizados como estructuras de absorción de energía.

***Palabras claves* —aplastamiento axial, diseño bioinspirado, resistencia al choque, palma de coco, absorción de energía, aplastamiento oblicuo.**

I. INTRODUCTION

In recent years, studies on thin-walled structures for energy absorption applications have increased. Among these applications are those used as complementary devices in automobile bumpers to absorb energy during a crash, here these structures play a very important role in safeguarding people's lives, or improving people's quality of life. Bumpers are among the automobile parts that have been studied in research and whose design can be improved using technology and new designs of bio-inspired structures.

This type of thin-walled structure is also used due to its irreversible energy conversion characteristic and mainly because of its high energy absorption capacity, lightweight and easy fabrication [1]. Other considerations should be taken into account at the time of design because they influence the energy absorption capacity, among them is the material used for fabrication. If aluminum alloy is used instead of steel, there are advantages such as lower weight and the possibility of helping the environment by reducing fuel consumption because of its lower weight. The boundary conditions of the structure as well as the type of cross-section of the structure (including internal design and wall thickness) must also be taken into account [2]–[4].

There are different mechanical tests to evaluate the performance of energy absorbing structures, these vary depending on the load orientation such as the axial load test, flexural collapse test and oblique load impact test. They also vary depending on the loading conditions and strain rate [5]. Testing and analysis of thin-walled structures under axial loading are one of the most commonly used to evaluate the performance of such structures, but if such a structure is used

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00126

in real life as a component of safety devices for crash events, it is unlikely that the energy absorbing device will be subjected to only axial or bending loading, it is more likely to be subjected to a combination of both. For vehicle design, the automotive industry requires the bumper system to withstand a load angle of 30° for the longitudinal axis [2]. For this reason, it is considered important to take into account the oblique load for the design of the impact resistance.

In this study, the shock resistance criteria were analyzed for 12 proposed models of which 6 are square-shaped tube models and 6 cylindrical-shaped tube models, additionally, conventional hollow structure with square and cylindrical shape is also analyzed. The models have an internal structure design inspired by the coconut palm (Cocos nucifera). The models are numerically analyzed using Abaqus software. Their performance is then compared to the conventional hollow structure and among the various designs. All models are analyzed under axial crushing load and oblique load from 5° to 30° with 5° intervals. Finally, the results of the performance of the designs under the two types of crushing loads are presented and analyzed.

II. Crashworthiness Criteria and Material Properties

A. Crashworthiness criteria

To evaluate the energy absorption characteristics of thin-walled tubes it is very common to find similar research with performance evaluation of this structure under some crashworthiness criteria using the load-displacement curve, among which are the following:

Energy absorption (EA): This criterion evaluates the capacity of the structure to absorb the total energy of the impact, i.e. the ability to dissipate the crushing force through plastic deformation. It corresponds to the area under the force-displacement curve, calculated by the integral [3], [6].

$$EA = \int_0^d F(x)dx \quad (1)$$

Where d corresponds to the total deformation distance and F is the impact force or crushing axial force.

Specific energy absorption (SEA): Corresponds to the energy absorbed per unit mass of the structure. It is the most important indicator in the design of energy-absorbing structures whose objective is to obtain a lightweight structure [7].

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

Where EA corresponds to the total energy absorbed by the structure and m corresponds to the mass of the structure to absorb energy. A high value determines the efficiency of the structure in its application as an energy absorber.

Mean crushing force (MCF): It is defined as the total energy absorbed between the corresponding displacement.

$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (3)$$

Peak crushing force (PCF): It represents the maximum force and is obtained from the force-displacement curve of the structure. It should be within a tolerance range for the deformation of the structure, as it is an indicator of the crushing force of the structure.

Crush force efficiency (CFE) is a measure of loading uniformity and efficiency of the structure. It is obtained by

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \times 100\% \quad (4)$$

B. Material properties

The material used for the tubes is aluminum alloy AA6063, its density is ρ = 2.7 x 103 kg/m3, a Young's modulus E = 68.2 GPa, a Poisson's ratio = 0.3, the Yield stress 185.5 MPa ultimate stress = 250 MPa and the ultimate strain 0.178. This aluminum alloy exhibits a small strain rate sensitivity [8]. During these analyses, the fracture behavior of the aluminum alloy was neglected. This material is widely used in similar research and therefore it was selected for this research to validate the models.

III. Modeling and Numerical Simulation

A. The design of the proposed bioinspired cylindrical and square tubes

The 3D modeling software SolidWorks v.28 (SolidWorks 2020 SP5.0) was used to create bioinspired designs. Developed designs show cylindrical and square thin-walled tubes, with different internal configurations inspired by the Panamanian coconut palm and literature consulted [9].

Fig. 1 represents cylindrical and square tubes as conventional structures against which bioinspired designs will be tested. These tubes are defined as the reference geometry due to their simplified shape.

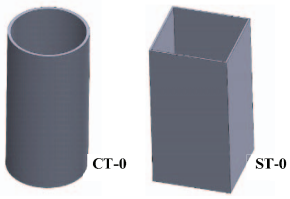


Fig. 1. The conventional cylindrical and square structure.

Fig. 2 (a-b) represents the first group of designs inspired by the structural characteristics of the vascular bundle and its distribution along the palm stem functioning as reinforcement [9]. After observing the distribution of the vascular bundles as presented in [9], the idea of using arches as reinforcement in the tubes (Figure 2, c) arose, and several designs were made and simplified as three cylindrical tubes of group 1 (CG1) and three square tubes of group 1 (SG1). Designs with lines instead of arches give a place to the designs of group 2 (CG2 and SG2) (See Fig. 3).

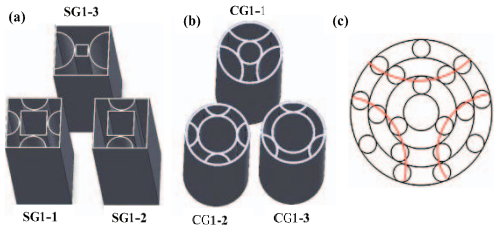


Fig. 2. Proposed bioinspired tubes (a) Square tubes of group 1 (b) Cylindrical tubes of group 1 (c) Bioinspired cross-section

It is important to mention that arches are structures that have been used since ancient times for their efficiency as structural elements. Arches in construction are used in bridges, buildings, and residences, including structural components such as foundations, beams, lintels, and deck elements [10]. Authors such as Sonavane [11] mention that arches are categorized as a special class structural system due to their compression mechanism to resist loads. Khalfallah [12] mentions that the concave geometry of arches plays an important role in them resisting bending and shear effectively.

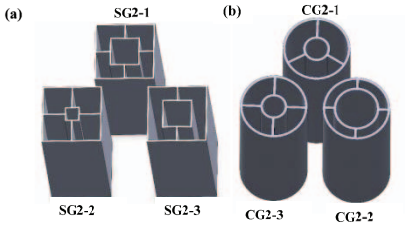


Fig. 3. Proposed bioinspired tubes (a) Square tubes of group 2 (b) Cylindrical tubes of group 2

The cross-section of each SG1 and SG2 has a length of L1 = 100 mm, the wall width is L2 = 40 mm, the inner wall width (L3) is variable, the wall thickness is t = 1 mm, the radius of the semicircles (r) and the length of the inner lines (r) are variable (See Table I and Fig. 4, b).

The cross-section of each CG1 and CG2 has a length of L = 100 mm, the diameter of the outer tube D1 = 37.5 mm, the diameter of the inner tube (D2) is variable, the wall thickness is t = 1.5 mm, and the radius of the semicircles (r) is variable (See Table II and Fig. 4, a). For this geometry, the thickness is greater than that of the square geometry, there is no numerical reason because the geometry is different. The variation effect of the wall thickness of the specimens shall be measured within the same type of design.

TABLE I. CODES AND GEOMETRIC SPECIFICATIONS OF THE PROPOSED SQUARE SPECIMENS

Specimen code	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	t (mm)	r (mm)
ST-0	100	40	-	1	-
SG1-1	100	40	18	1	9
SG1-2	100	40	18	1	9
SG1-3	100	40	10	1	15
SG2-1	100	40	18	1	9
SG2-2	100	40	8	1	14
SG2-3	100	40	18	1	9

TABLE II. CODES AND GEOMETRIC SPECIFICATIONS OF THE PROPOSED CYLINDRICAL SPECIMENS

Specimen code	L (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	t (mm)	r (mm)
CT-0	100	37.5	-	1.5	-
CG1-1	100	37.5	12	1.5	13.5
CG1-2	100	37.5	21	1.5	6.7
CG1-3	100	37.5	22.5	1.5	8.4
CG2-1	100	37.5	12	1.5	10
CG2-2	100	37.5	22.5	1.5	4.5
CG2-3	100	37.5	12	1.5	10

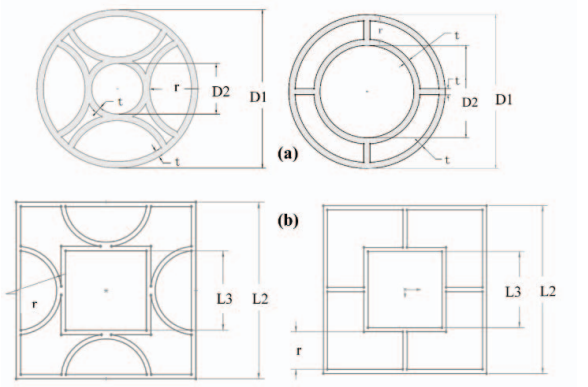


Fig. 4. Proposed bioinspired tubes (a) Square tubes of group 2 (b) Cylindrical tubes of group 2

B. *Methodology for numerical simulations*

- Under axial loading

Fig. 5 shows a scheme that represents the conditions under which the axial simulations of each tube were performed. All under the same axial loading conditions, boundary conditions and using the same material.

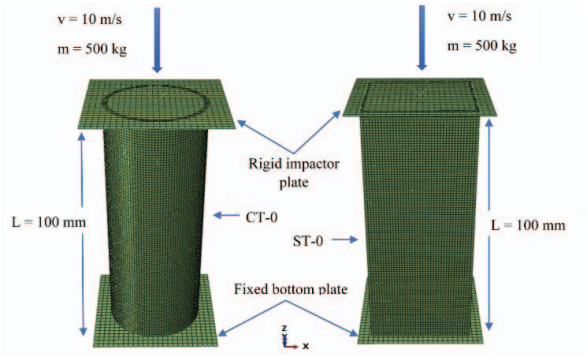


Fig. 5. Schematic of the finite element model subjected to axial impact crushing force.

An explicit nonlinear analysis in Abaqus/CAE was performed, first, the model design was imported from SolidWorks to a compatible format in Abaqus, the top and bottom plates were drawn and defined as rigid, and the material properties of aluminum Al6063 were assigned to the tube. Then, the top plate is assigned a Point mass/ inertia of 500kg at the centroid. It is choosing the simulation analysis type as Dynamic, Explicit with a period of 0.005 seconds. Next, in the Interaction section, set the friction coefficient to 0.2 of the general contact type (Explicit). Now the boundary condition is set, the contact zone between the bottom plate and the tube is engagement type without displacement or rotations, for the

top plate it is left only free displacement in the z-axis. For the top plate, the initial impact velocity v = 10 m/s is set.

For the meshing, a Standard element type with a linear geometric order was chosen, and the approximate global size was set to 1.0 mm for the tube and 2.0 mm for the plates. This mesh size provides high accuracy of the results without excessively long simulation time. Additionally, there are several studies such as [3], [6], [10], and [11] showing that a mesh size greater than 2.0 mm shows a greater range of error during the crushing process and when the value is less than 2.0 mm there is convergence for the results but the computation time increases. Based on the analysis of previous variables and the mentioned studies, a meshing of 1.0 mm is adopted for the tubes, since it achieves a balance between computational efficiency and accuracy of the numerical model results. To avoid increasing the computational time, a 2.0 mm mesh was selected for the upper and lower plates. Finally, the full analysis is performed in the Job section, and the results are obtained.

- Under oblique loading

Fig. 6 shows a schematic of the finite element model used to evaluate the models proposed under an oblique impact force. The only thing different from the FE modeling of axial impact crushing force is that the impactor hitting tube does not hit it axially but has an impact angle ranging from 5 to 30 degrees, with 5° intervals. That is, the upper plate has free displacement on the z-axis, y-axis, and x-axis. The cross-section of 12 proposed bioinspired models does not change and neither does the cross-section of the 2 conventional structures with hollow cross-sections.

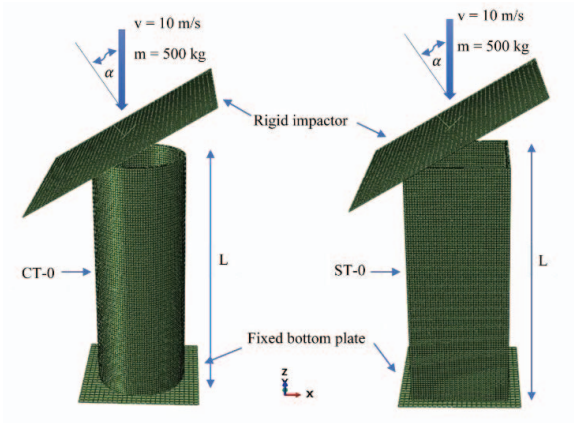


Fig. 6. Schematic of the finite element model subjected to oblique impact force.

- Validation of the finite element model

To validate my finite element model, the simulation was carried out under the same dimensions and axial impact loading conditions as the experimental research of [12] and then compared thus simulation results with [12] experimental results, which studies the energy absorption in a thin-walled square tube under dynamic impact crushing. The thin-walled tube is 200 mm long and the material is aluminum AL6063. The impactor weighs 40kg and is placed at a certain distance from the top of the tube which impacts at a velocity of 7.02 m/s. The weight and speed values meet the impact safety requirements for vehicles.

Fig. 7 shows the comparison of the deformation patterns between the experimental and numerical results, there is a coincidence between the two. But it is noticeable that there is a difference in the deformation patterns and force versus displacement curves mainly in the initial peaks of the curve (figure 8, b). Although the curves do not exactly match, they describe the same trend, this may be because there is a difference in the characterization of the materials used for the experimental and numerical results, also a different software is used and not all considerations for the simulation are known in [12]. Therefore, these results are the validation of this finite element model that will be used in the evaluation of the bioinspired tubes of this research.

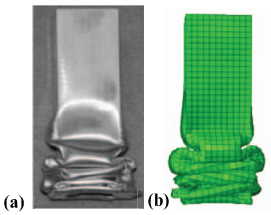


Fig. 7. Validation. Comparison of deformation patterns of square thin-walled structure between (a) experimental [12] and (b) numerical results.

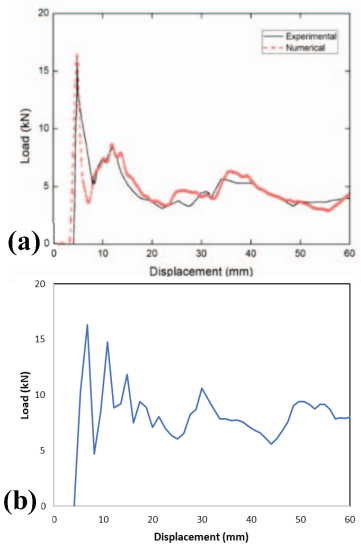


Fig. 8. Validation. Comparison of force vs displacement curves between (a) experimental [13] and (b) numerical results

IV. Crashworthiness Analysis and Results

- Under axial loading

Investigations that involve thin wall structures perform several types of tests, but it is very common to make tests to know the performance of the structure against axial crushing force.

Fig. 9, 10, 11, and 12 show how the different tube models collapsed due to the axial impact load condition applied in the negative z-direction. Each model is observed at the beginning when it has a displacement of 0 mm and then the collapse of each one is observed whose displacement is approximately 49 mm. All square models, including the conventional structure, had an asymmetric modal collapse. From cylindrical models, only the conventional structure, models CG1-2 and CG1-3

had a symmetric modal collapse. The rest of the cylindrical models collapsed asymmetrically.

The crashworthiness criteria used to evaluate the performance of each model are energy absorption (EA), specific energy absorption (SEA), mean crushing force (MCF), peak crushing force (PCF), and crushing force efficiency (CFE). Recalling that each square model has a thickness of 1 mm, with a maximum displacement of approximately 50 mm, known as crushing length (CL). In addition, each cylindrical model has a thickness of 1.5 mm, with a maximum displacement of approximately 49 mm, see Table III and Table IV.

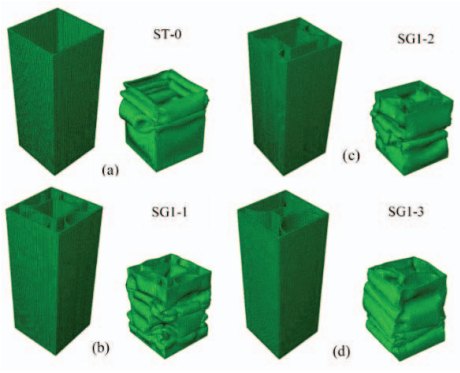


Fig. 9. Mesh and deformed shapes under axial loading of (a) Conventional square tube (b-d) Square tubes of group 1

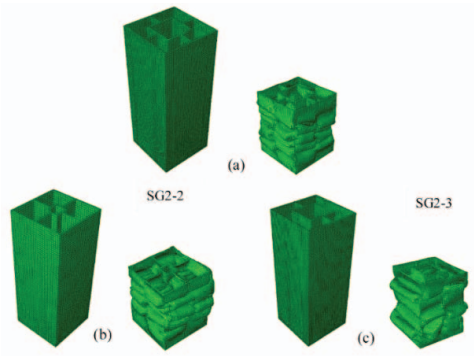


Fig. 10. Mesh and deformed shapes under axial loading of square tubes from group 2

Bioinspired models versus conventional hollow structures have superior performance, with approximately 2.4 times more PCF, 3.5 times more EA, 1.7 times more specific energy absorption, 3.6 times more MCF, and 22% more CFE. Here the bioinspired model that stands out depending on the geometry and crashworthiness criteria is SG1-1 because had higher values for all crashworthiness criteria, and from cylindrical models is CG1-2 because performed the best for EA, SEA, MCF, and PCF. Other models that stood out were SG2-1, CG1-1, and CG1-3, see Table III and Table IV.

Another way of performing analysis was by comparing the results of square models and cylindrical models; better performance was obtained with models whose geometry has a cylindrical shape for each of the crashworthiness parameters evaluated.

The performance of models with arches (group 1) and models with lines (group 2) was also compared for both square and circular tubes in two ways: by comparing the highest value of respective crashworthiness criteria for both groups and by obtaining the average of each crashworthiness criteria for both groups. From the case of square tubes, the design with arches of group 1 has better performance than the internal design with lines of group 2, except when comparing the average SEA for each group in square tubes because group 1 has almost equal performance than the second group. From the case of cylindrical tubes, the arched design of group 1 also performs better than the group 2 design. Fig. 13 shows specific energy absorption (SEA) for all bioinspired models and conventional cylindrical and square tube structures.

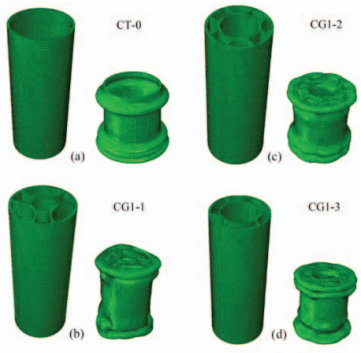


Fig. 11. Mesh and deformed shapes under axial loading of (a) Conventional cylindrical tube (b-d) Cylindrical tubes of group 1

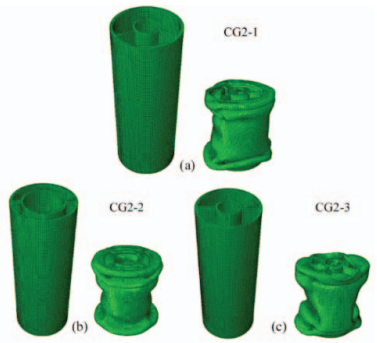


Fig. 12. Mesh and deformed shapes under axial loading of cylindrical tubes from group 2

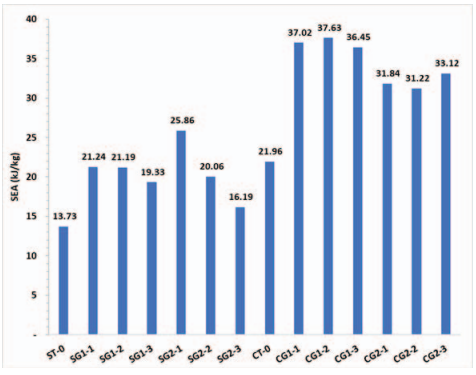


Fig. 13. Specific energy absorption (SEA) for conventional structures and bioinspired models under axial loading.

TABLE III. NUMERICAL RESULTS OF CRASHWORTHINESS CRITERIA FOR SQUARE MODELS UNDER OBLIQUE LOADING

	t (mm)	Mass (g)	CL (mm)	EA (J)	PCF (kN)	MCF (kN)	CFE (%)	SEA (kJ/kg)
ST-0	1	37.964	49.675	521.194	27.005	10.492	38.852	13.729
SG1-1	1	92.815	48.977	1971.750	65.786	40.259	61.197	21.244
SG1-2	1	77.729	49.184	1647.020	55.779	33.487	60.036	21.189
SG1-3	1	75.400	49.214	1457.510	53.824	29.616	55.023	19.330
SG2-1	1	57.563	49.253	1488.550	51.334	30.223	58.874	25.860
SG2-2	1	66.960	49.417	1343.120	47.785	27.179	56.878	20.059
SG2-3	1	67.500	49.435	1092.520	48.033	22.100	46.010	16.185

TABLE IV. NUMERICAL RESULTS OF CRASHWORTHINESS CRITERIA FOR CYLINDRICAL MODELS UNDER OBLIQUE LOADING

	t (mm)	Mass (g)	CL (mm)	EA (J)	PCF (kN)	MCF (kN)	CFE (%)	SEA (kJ/kg)
CT-0	1.5	45.804	49.484	1005.990	33.745	20.330	60.245	21.963
CG1-1	1.5	90.000	48.371	3331.670	76.765	68.878	89.725	37.019
CG1-2	1.5	94.513	48.132	3556.810	85.680	73.897	86.247	37.633
CG1-3	1.5	90.177	48.337	3286.630	79.383	67.995	85.654	36.446
CG2-1	1.5	74.836	48.754	2382.890	57.114	48.876	85.576	31.841
CG2-2	1.5	83.634	48.630	2611.290	66.464	53.698	80.792	31.223
CG2-3	1.5	78.788	48.650	2609.590	63.498	53.640	84.476	33.122

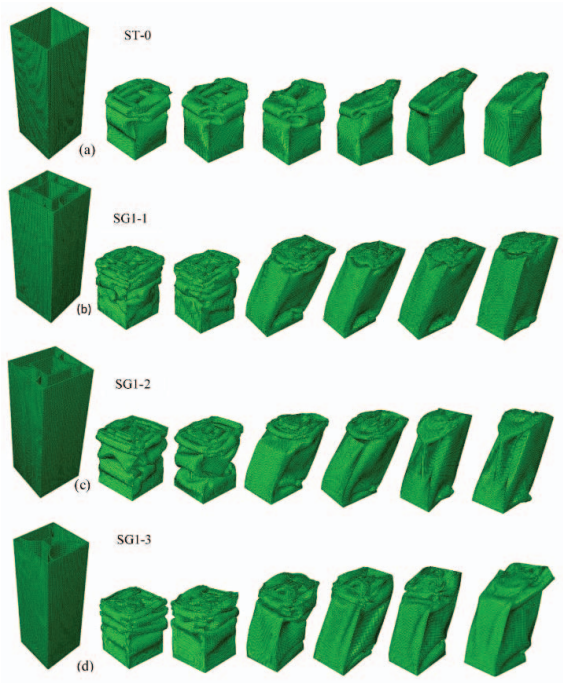


Fig. 14. Mesh and deformed shapes under oblique loading for every load angle (a) Conventional structure (b-d) Square tubes from group 1

- Under oblique loading

Fig. 14, 15, 16, and 17 shows how different tube models collapsed due to oblique impact load condition applied at angles of 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, and 30°. Each model is observed at the beginning when it has a displacement of 0 mm and then we observe the collapse of each one as the impact load angle changes, the maximum displacement is approximately 50 mm. The collapse mode for all tested tubes is observed to have a progressive asymmetric mode of deformation at the beginning with no similar folds but with an alternating formation with bulging and then there is a transition to the global bending mode of deformation, which was caused by the inclination of rigid impactor as the angle increased.

For angles from 0° to 30° models SG1-1, SG1-2, SG1-3, SG2-1, SG2-2, and SG2-3 under axial test (0°) present the highest indices for criteria of EA, PCF, MCF, and SEA, whose values decrease as load impact angle increases. But this is not the case for PCF of models SG1-1 and SG1-2 because this value is higher at 0° but between 5° and 30°, it varies depending on the angle. In the case of the CFE criterion for all models, this percentage varies without a clear trend, depending on the model tested and the angle.

For angles from 0° to 30° models CG1-1, CG1-2, CG1-3, CG2-1, CG2-2, and CG2-3 under axial test (0°) present the highest indices for criteria of EA, PCF, MCF, and SEA, whose values decrease as load impact angle increases. But this is not the case for PCF of models CG2-1 and CG2-3 because this value is higher at 0° but between 5° and 30°, it varies depending on the angle. In the case of the CFE criterion for all

models, this percentage varies without a clear trend, depending on the model tested and the angle.

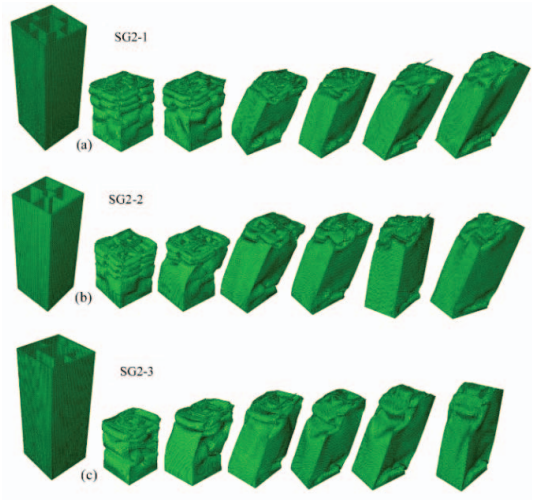


Fig. 15. Mesh and deformed shapes under oblique loading for every load angle of square tubes from group 2

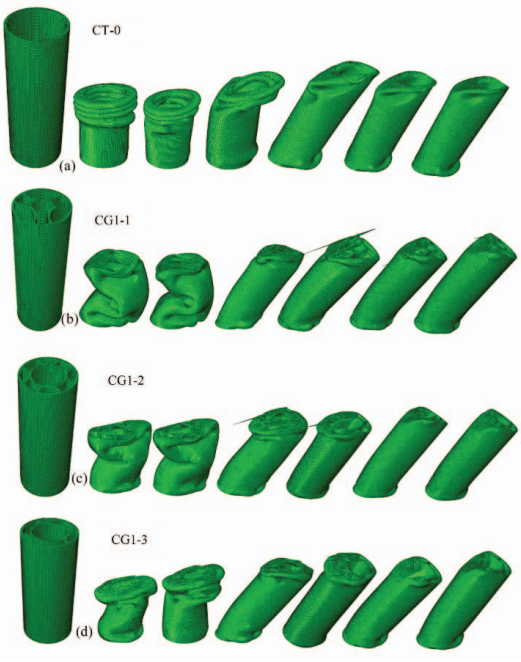


Fig. 16. Mesh and deformed shapes under oblique loading for every load angle (a) Conventional structure (b-d) Cylindrical tubes from group 1

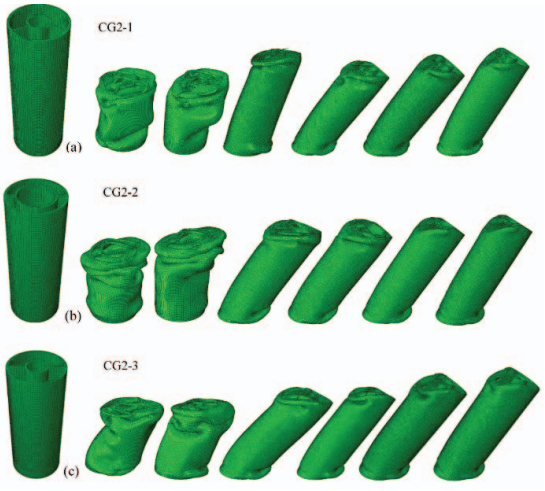


Fig. 17. Mesh and deformed shapes under oblique loading for every load angle of cylindrical tubes from group 2

Fig. 18 and Fig. 19 show how models behave as load inclination angle increases; it is observed that values of SEA criterion decrease in bioinspired cylindrical and square models.

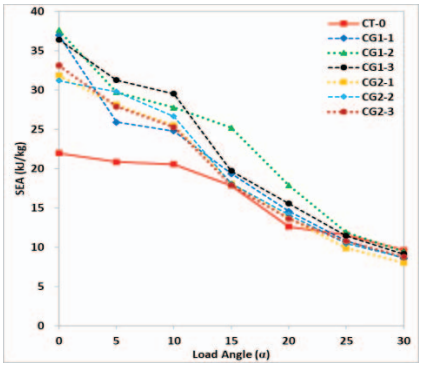


Fig. 18. SEA of conventional structure and cylindrical tubes vs load angle under oblique loading

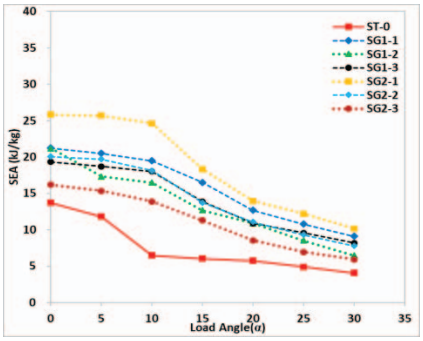


Fig. 19. SEA of conventional structure and square tubes vs load angle under oblique loading

V. CONCLUSIONS

Twelve Panama coconut palm (Cocos nucifera) bioinspired tube designs were tested in this research, but it should be remembered that it can be difficult to mimic the efficiency of

bioinspired materials for production at the industrial level. Within design testing, numerical simulation was chosen since there are challenges for fabrication and experimental testing that may include limitations in the size and number of fabricated models, as well as high cost and time consumption to achieve desired structural characteristics.

From numerical simulation with axial crush loading the results show that the bio-inspired models are better than the traditional hollow models because for EA, SEA, MCF, and CFE crashworthiness criteria better results were obtained with bioinspired models instead of the conventional hollow structure.

To compare the different bio-inspired models with the conventional hollow structure, the maximum crushing force and the specific energy absorption criterion were evaluated, i.e. the energy absorption per unit mass for each model evaluated was compared. This is used to compare the results of different investigations using the same material regardless of design and mass. Then, square geometry bioinspired models SG1-2 and SG2-1 gave better results compared to conventional structure ST-0, and cylindrical geometry bioinspired models CG1-1 and CG2-1 gave better results compared to conventional structure CT-0. It is important to mention that when comparing results for crashworthiness criteria depending on geometric shape and internal design that includes arches (group 1) and those models that include lines instead of arches (group 2), a better performance was obtained with models whose geometry has a cylindrical shape and are part of group 1.

Results under oblique crushing load for EA, SEA, PCF, and MCF crashworthiness criteria of all models show the highest index when the impact angle is lower, and its value decreases as the angle increases. But this is not the case for PCF of models SG1-1, SG1-2, CG2-1, and CG2-3 because this value is higher at 0° but between 5° and 30°, it varies depending on the angle. In the case of CFE criteria for all models, this percentage varies without a clear trend, depending on the model tested and the angle. Then, as the angle increases, there is less impact on the structure, so it works less efficiently.

Finally, new designs were obtained from the highlighted models, which, although they are not the best in comparison with other designs in the literature, do have the potential to be used as energy absorbing structures.

REFERENCES

[1] L. Guoxing and Y. Tongxi, *Energy Absorption of Structures and Materials*, 1st Editio. .

[2] A. Reyes, M. Langseth, and O. S. Hopperstad, "Square aluminum tubes subjected to oblique loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 28, no. 10, 2003, doi: 10.1016/S0734-743X(03)00045-9.

[3] N. S. Ha, G. Lu, and X. Xiang, "High energy absorption efficiency of thin-walled conical corrugation tubes mimicking coconut tree configuration," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 148, pp. 409–421, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.08.041.

[4] W. Abramowicz, "Thin-walled structures as impact energy absorbers," *Thin-Walled Struct.*, vol. 41, no. 2–3, pp. 91–107, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0263-8231(02)00082-4.

[5] B. S. Lazarus, A. Velasco-Hogan, T. Gómez-del Río, M. A. Meyers, and I. Jasiuk, "A review of impact resistant biological and bioinspired materials and structures," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 15705–15738, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.062.

[6] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, and Z. Zhang, "Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing," *Compos. Part B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.095.

[7] Y. Zhang, J. Wang, T. Chen, M. Lu, and F. Jiang, "On crashworthiness design of double conical structures under oblique load," *Int. J. Veh. Des.*, vol. 76, no. 1–4, 2018, doi: 10.1504/IJVD.2018.096095.

[8] D. Karagiozova, G. N. Nurick, and S. Chung Kim Yuen, "Energy absorption of aluminium alloy circular and square tubes under an axial explosive load," *Thin-Walled Struct.*, vol. 43, no. 6, pp. 956–982, Jun. 2005, doi: 10.1016/J.TWS.2004.11.002.

[9] N. Marín, E. Reyes, K. Wang, and N. Serrano, "Diseño bioinspirado en la palma de coco de Panamá para estructuras de absorción de energía," *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. 37–49, Mar. 2022, doi: 10.33412/IDT.V18.1.3500.

[10] J. Xiang and J. Du, "Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb structure under axial impact loading," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 696, pp. 283–289, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.04.044.

[11] Y. Xiao, H. Yin, H. Fang, and G. Wen, "Crashworthiness design of horsetail-bionic thin-walled structures under axial dynamic loading," *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 12, no. 4, pp. 563–576, Dec. 2016, doi: 10.1007/s10999-016-9341-6.

[12] K. S. Lee, Y. J. Yang, S. K. Kim, and I. Y. Yang, "Energy absorption control characteristics of AL thin-walled tubes under impact load," *Acta Mech. Solida Sin.*, vol. 21, no. 4, pp. 383–388, Aug. 2008, doi: 10.1007/S10338-008-0847-9.

[13] J. Xiang, J. Du, D. Li, and F. Scarpa, "Numerical analysis of the impact resistance in aluminum alloy bi-tubular thin-walled structures designs inspired by beetle elytra," *J. Mater. Sci.*, vol. 52, no. 22, pp. 13247–13260, Nov. 2017, doi: 10.1007/s10853-017-1420-z.

Comparison of Surface Plasmon Excitation by Light and Electrons in Gold Nanorods

Comparación entre la Excitación de Plasmones de Superficie Mediante Luz y Electrones en Nanorods de Oro

Franck Aguilar
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panamá
franck.aguilar@utp.ac.pa

Xiaoyan Li
Laboratoire de Physique des Solides
Université Paris-Saclay
Orsay, France
xiaoyan.li@universite-paris-saclay.fr

Mathieu Kociak
Laboratoire de Physique des Solides
Université Paris-Saclay
Orsay, France
mathieu.kociak@universite-paris-saclay.fr

Alfredo Campos
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
Panama, Panamá
alfredo.campos@utp.ac.pa

***Abstract*— Surface plasmons resonance is the most prominent optical property of metal nanostructures, which consists of oscillation of the free electron cloud excited by an incident electromagnetic field. To achieve its excitation, it can be made by electromagnetic radiation incidence or through charged particles. The technique for studying electron excitation is known as electron energy loss spectroscopy (EELS), which is coupled to transmission electron microscopes. Through this research, it is desired to compare, both by numerical simulations, and by experimental techniques of UV-Visible spectrophotometry and EELS spectroscopy, the characteristics of this type of excitation in gold nanorods. Matlab software with the MNPBEM package was used to perform numerical simulations, which is based on the boundary element method to solve Maxwell's complete equations and know the spectra and charge distributions in nanoparticles under light and electron excitation. The experimental study was performed on gold nanorods samples of approximately 38 nm in length and 10 nm in diameter. The results obtained by UV-Visible spectrophotometry show a longitudinal and a transverse mode while the EELS spectra shows the excitation of the dipolar longitudinal mode and higher order modes.**

Keywords—surface plasmon, gold nanorod, EELS, longitudinal mode, absorbance.

***Resumen* — La resonancia de plasmones superficiales es la propiedad óptica más destacada de las nanoestructuras metálicas, la cual consiste en la oscilación de la nube de electrones libres excitada por un campo electromagnético incidente. Para lograr su excitación se puede hacer incidencia de radiación electromagnética o a través de partículas cargadas. La técnica que permite el estudio de la excitación por electrones se conoce como espectroscopia de pérdida de energía de electrones (EELS, por sus siglas en inglés), la cual se acopla a microscopios electrónicos de transmisión. A través de esta investigación, se desea comparar, tanto mediante simulaciones numéricas, como mediante técnicas experimentales de espectrofotometría UV-Visible y espectroscopía EELS, las características de este tipo de excitación en nanorods de oro. Para realizar simulaciones numéricas se utilizó el software Matlab con el paquete MNPBEM, el cual se basa en el método de elemento de frontera para resolver las ecuaciones completas de Maxwell y conocer los espectros y distribuciones de carga en nanopartículas bajo la excitación con luz y con electrones. El estudio experimental se realizó en muestras de nanorods de oro de aproximadamente 38 nm de largo y 10 nm de a diámetro. Los resultados obtenidos mediante espectrofotometría UV-Visible muestra un modo longitudinal y uno transversal, mientras que los espectros EELS muestran la excitación del modo longitudinal dipolar y de orden superior.**

Palabras claves —plasmón de superficie, nanorod de oro, EELS, modo longitudinal, absorbancia.

I. INTRODUCCIÓN

Los plasmones de superficie son generados el campo eléctrico de una onda electromagnética incidiendo sobre nanopartículas metálicas. Cuando la luz incide sobre una nanopartícula es posible excitar modos de resonancia de plasmones de superficie a distintas longitudes de onda, esto dependerá del tamaño, forma, material e índice de refracción del medio dieléctrico que la contiene. Por otro lado, también es posible excitar un plasmón de superficie con electrones de alta energía, como los que se generan en un microscopio electrónico de transmisión (TEM) o TEM de exploración (STEM) [1].

De manera similar a la interacción de nanopartículas con el campo eléctrico oscilante de la luz, el plasmón de superficie excitado por electrones tendrá resonancia a una frecuencia específica, determinada por el tamaño, la forma, tipo de metal y el entorno dieléctrico que rodea la nanopartícula. Un enfoque experimental para obtener información de plasmones por incidencia de un haz de electrones es mediante microscopia electrónica de transmisión en regiones de baja pérdida de energía, mediante la espectroscopía de pérdida de energía electrónica EELS (por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en la utilización de un haz de electrones con alta energía cinética (normalmente entre 60 keV a 200 keV) para atravesar o pasar cerca de una nanopartícula metálica, excitando los plasmones y por lo tanto perdiendo una pequeña fracción de energía. Mediante la detección de esta pérdida de energía y haciendo un barrido espacial con el haz de electrones

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00127

a través de la partícula, se obtiene un mapeo espacio-espectral de la oscilación plasmónica [2].
Esta oscilación plasmónica puede ser comparada con la obtenida mediante la excitación por luz. Experimentalmente esto es posible a través de la espectroscopia ultravioleta-visible, la cual es una técnica ampliamente conocida y utilizada en la caracterización óptica de muestras con la finalidad de analizar características como absorción, reflexión y transmisión de luz. Esta se basa en la espectroscopia de fotones en la región de radiación ultravioleta-visible, región del espectro electromagnético en la cual las moléculas se someten a transiciones electrónicas [3] y se excitan plasmones de superficie en nanopartículas metálicas. Con esta técnica se obtiene la absorbancia en muestras de soluciones coloidales de nanopartículas metálicas la cual es proporcional a la sección eficaz de extinción, parámetro que nos brinda información de la resonancia de plasmones de superficie para la nanoestructura analizada, la cual representa la suma entre la sección eficaz de absorción y la sección eficaz de dispersión de luz.
Teóricamente es posible calcular la sección eficaz de extinción mediante métodos numéricos, uno de ellos es el Boundary Element Method (Método del elemento de borde), mayormente conocido como método BEM. Con la finalidad de resolver numéricamente las cargas y corrientes en las superficies de las nanopartículas metálicas, así como los campos electromagnéticos, se puede utilizar el toolbox de Matlab llamado MNPBEM [4], esta es una herramienta para la simulación de nanopartículas metálicas utilizando el método BEM [5], el cual permite realizar distintas variaciones en las nanopartículas y obtener espectros de absorción, extinción y dispersión de la luz. Básicamente se establecen variaciones de forma, material (metal), tamaño de las nanopartículas, además del índice de refracción del medio donde están inmersas. Una vez establecidas las condiciones de la nanopartícula, MNPBEM resuelve las cargas superficiales y las corrientes con el método BEM. Esto lo hace de dos maneras posibles, a través de la aproximación cuasiestática o con la resolución de las ecuaciones completas de Maxwell [6]. Esta herramienta permite realizar simulaciones, no solo haciendo incidir radiación electromagnética de la luz, sino también utilizando electrones energéticos (EELS).
Se ha demostrado que existe una proporcionalidad entre la sección eficaz de extinción $\sigma_{ext}(\omega)$ y la probabilidad de pérdida de energía de los electrones (denotada por $\Gamma(\omega)$) para el modo dipolar (L=1) en una esfera en el régimen cuasiestático (tamaños inferiores a los 50 nm) [7].

$$\Gamma_{L=1}(\omega) \propto \omega\, \sigma_{ext}(\omega) \left\{ \left[K_0\left(\frac{\omega x_0}{v}\right)\right]^2 + \left[K_1\left(\frac{\omega x_0}{v}\right)\right]^2 \right\} \quad (1)$$

Donde K_0 y K_1 son funciones de Bessel modificadas de segunda especie, las cuales dependen de la frecuencia ω , del parámetro de impacto del electrón incidente x_0 y la velocidad del electrón incidente v.
Si bien esta relación es válida para esferas, la comparación óptica-EELS para estructuras más compleja puede estudiarse a través de métodos numéricos. El método BEM permite realizar comparaciones de modos plasmónicos obtenidos mediante excitación por luz y electrones con la finalidad de buscar la correspondencia óptica-EELS de los espectros, además de los mapas de distribuciones de carga en la nanoestructura analizada.
Se han realizado análisis EELS comparativos de modos excitados en distintas formas de nanopartículas desde un enfoque teórico-experimental [8]. En esta investigación se propone una caracterización de modos desde un enfoque óptica-EELS tanto teórico como experimental. La caracterización e identificación de modos transversales y longitudinales en nanoestructuras complejas como nanorods, es de suma importancia para tener una idea clara de cuales de ellos son excitados propiamente por luz o por haz de electrones, además de poder visualizar la intensidad de las distribuciones de carga eléctrica e intensidad del módulo del campo eléctrico para cada modo excitado en la nanopartícula.

Existe una limitación para estudiar partículas individuales con técnicas ópticas con resolución sub-nanométrica de manera experimental. Técnicas como SNOM (Scanning near-field optical microscopy) permiten estudiar partículas individuales, pero no con una resolución espacial como la obtenida por STEM-EELS. Por esta razón se utiliza la técnica de absorbancia óptica en un conjunto de partículas en solución donde su tamaño es bien conocido.

II. MÉTODOLOGÍA

A. Espectrofotometría UV-visible

Soluciones coloidales de nanorods de oro con longitudes de 38 nm y radios de 10 nm, fueron diluidas en agua destilada hasta una densidad óptica (OD) cercana a 1.2. Estas soluciones fueron adquirida comercialmente a través de la empresa Sigma-Aldrich. En la espectroscopia UV-visible, la densidad óptica es la medida de la absorbancia, y se define como el logaritmo de base diez de la razón entre la intensidad de la luz que incide sobre un material y la intensidad transmitida. La densidad óptica es directamente proporcional a la sección eficaz de extinción. Estos parámetros se relacionan a través de la siguiente ecuación:

$$OD = log\,(e)\, n\ \sigma_{ext}\, L \quad (2)$$

Donde σ_{ext} es la sección eficaz de extinción, n es el número de partículas por unidad de volumen y L es la longitud del camino óptico en la muestra, en este caso equivale a la longitud del ancho de la cubeta de espectrofotometría (normalmente 1cm).

B. Espectromicroscopia STEM-EELS

Para evaluar la información sobre resonancia de plasmones de superficie excitados por un haz de electrones se utilizó la técnica STEM-EELS (Scanning Transmission Electron Microsocope – Electron Energy Loss Spectroscopy) la cual permite estudiar las propiedades ópticas de nanopartículas individuales con una resolución espacial en la escala sub-nanométrica (< 1 nm). Esto se realizó en el Laboratoire de Physique des Solides en Orsay Francia con el grupo de investigación STEM en el microscopio electrónico UltraSTEM 200 de la empresa NION con el cual se analizaron muestras de nanorods de oro depositadas en un sustrato de Si_3N_4 para la caracterización. Se obtuvieron espectros imagen (SPIM) para cada nanorod analizado, el

mismo posee información espectral y espacial propias de la nanoestructura analizada. La información espectral corresponde a espectros EELS con modos de resonancia que poseen similitudes y diferencias a los obtenidos en óptica que discutiremos más adelante. A estos espectros EELS se les realiza un tratamiento de remoción de spikes, alineamiento de los espectros y deconvolución utilizado Digital Micrograph y Hyperspy [9], esta última es una librería gratuita de Python. Además, con el uso de estos softwares es posible obtener mapas EELS para cada modo de resonancia presente en el espectro, estos mapas brindan información de la simetría de los modos de oscilaciones presentes.

C. Simulaciones luz-nanorod

Se realizaron simulaciones en Matlab con el toolbox MNPBEM donde se establecieron condiciones para simular la interacción entre la luz incidente y un nanorod de oro con dimensiones de 38 nm de longitud y 10 nm de diámetro, en un medio con un índice de refracción de 1.50, haciendo incidir una onda plana de luz por -Z, obteniendo así dos espectros de sección eficaz de extinción para polarización en X y polarización en Y (ver Fig.1a). Se registraron las longitudes de onda correspondientes a cada pico para realizar mapas de distribuciones de carga eléctrica en la nanopartícula, y así determinar los modos de oscilación presentes en cada espectro obtenido.

D. Simulaciones EELS

En MNPBEM se simula la espectroscopía EELS en nanopartículas metálicas estableciendo condiciones para simular la interacción entre un haz de electrones incidente y nanopartículas metálicas, en este caso se estableció, al igual que para simulaciones en óptica, un nanorod de oro con dimensiones de 38 nm de longitud y 10 nm de diámetro, en un medio con un índice de refracción de 1.50. Cada simulación arrojaría la probabilidad de pérdida de energía cuando se hace incidir cerca de la nanopartícula un haz de electrones obteniendo así espectros correspondientes a los plasmones de superficie. Se envió el haz de electrones a un nanómetro del nanorod en tres posiciones distintas (Fig. 2a). El objetivo de estas simulaciones EELS es comparar con las simulaciones en óptica y observar cuales modos son más fáciles de ver con una u otra técnica. Esto nos brinda información adicional sobre las propiedades ópticas de las nanopartículas. El haz de electrones incide por -Z, y se fija un punto de impacto del electrón en el plano X-Y del nanorod. Al igual que en óptica se registraron las longitudes de onda correspondientes a cada pico de resonancia para realizar simulaciones y obtener mapas de distribuciones de carga eléctrica en el nanorod, para verificar los modos de oscilación presentes en cada espectro obtenido. Estos mapas muestran si los modos son principalmente transversales o longitudinales, dependiendo de la dirección de oscilación de los electrones libres en la nanopartícula, además de esto, muestran si estas distribuciones son dipolares, cuadrupolares o de orden superior.

Se realizó la comparación espectral entre EELS y óptica, además se realizó la comparación espacial a través de mapas de carga de EELS y óptica para ver similitudes y diferencias.

III. Resultados y Discusiones

Se realizó la medición de absorbancia por espectrofotometría UV-Visible a la solución coloidal de nanorods de oro con tamaños aproximados a 38 nm de largo y 10 nm de diámetro. La Fig.1b muestra el espectro obtenido (curva negra). Este espectro muestra dos picos de resonancia de plasmones, el más intenso es el modo L=1 a los 778 nm que corresponde al modo longitudinal dipolar y otro a 511 nm que corresponde al modo transversal. Este espectro se comparó con los obtenidos mediante espectroscopia EELS a un nanorod de oro, con una longitud de 45 nm y un diámetro de 10 nm, en tres direcciones distintas fuera de la nanopartícula (Figura 1a) por lo que se obtuvo tres espectros propios de cada dirección y se comparó con el espectro de absorbancia (Figura 1b).

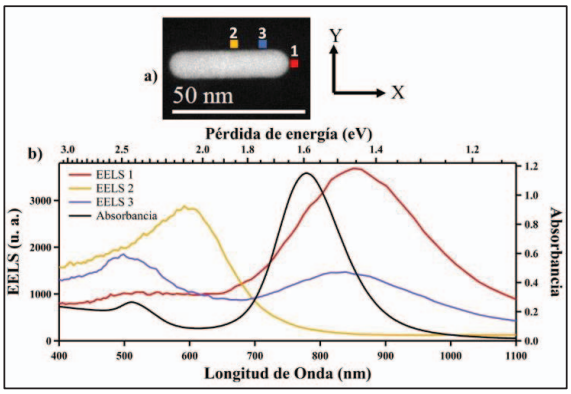


Fig. 1. a) Imagen STEM de un nanorod de oro el cual muestra tres direcciones de incidencia de electrones. b) Comparación experimental entre espectro de absorbancia óptica y espectros EELS.

No hay coincidencia entre la absorbancia y los espectros EELS debido a que la absorbancia mide la resonancia de n nanopartículas con tamaños cercanos (longitudes promedio de 38 nm) y el nanorod que se eligió para el análisis EELS era uno de los más grandes (longitud de 45 nm) para poder realizar una evaluación más clara de los modos encontrados. Además, el índice de refracción del medio es diferente en ambas técnicas, en óptica es el agua y en EELS la partícula está soportada sobre un sustrato en vacío. En cuanto a los modos encontrados en EELS se puede observar tres modos distintos, el modo dipolar longitudinal L=1 excitado por las direcciones EELS 1 y 3 cercano a los 838 nm. La dirección EELS 2 excita un segundo modo longitudinal cercano a los 585 nm que no logran excitar las otras dos direcciones. Un tercer modo cercano a los 490 nm es excitado en las direcciones EELS 1 y 3. Es posible que la dirección EELS 2 también lo excite, pero al ser el segundo modo L=2 muy prominente, este no se alcanza a observar propiamente en el espectro.

En cuanto a las simulaciones numéricas con MNPBEM para óptica se envió luz en -Z y se obtuvieron dos espectros, uno para la polarización en X y otro para la polarización en Y. En las simulaciones EELS se establecieron tres direcciones de incidencia para el haz de electrones (Figura 2a), cada una de ellas a un nanómetro del nanorod. Estas direcciones arrojaron espectros respectivos los cuales fueron comparados con los dos espectros de óptica (Fig. 2b). A diferencia de las limitaciones experimentales en cuanto al medio que rodea las partículas, en las simulaciones se puede colocar el mismo medio circundante para hacer una comparación más precisa.

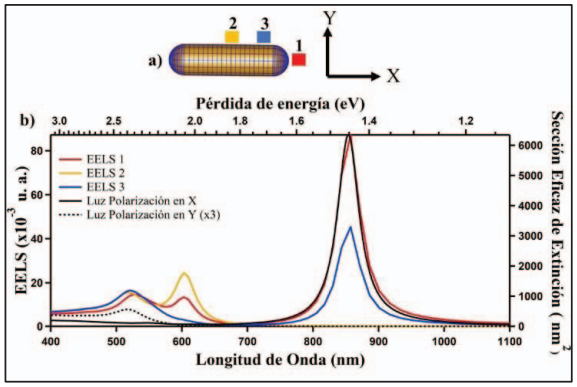


Fig. 2. a) Nanorod de oro a simular tanto en interacción con luz y con haz de electrones en las tres direcciones de incidencia analizadas marcadas como 1, 2 y 3. b) Comparación entre espectro de sección eficaz de extinción y espectros EELS mediante simulaciones numéricas.

Los espectros producto de las direcciones EELS 1 y 3 poseen coincidencia en el modo L=1 cercano a los 857 nm, además coincide con el modo L=1 obtenido por luz en la polarización 'X'. Cabe resaltar que en óptica solamente se excitan dos modos, uno producto de la polarización X y otro por la polarización Y. El modo L=2 es excitado por las direcciones EELS 1 y 2 y aparece a una longitud de onda de 602 nm, este modo no posee correspondencia en óptica por lo que es un modo oscuro. Los modos oscuros son aquellos que no son posible excitar mediante la incidencia de luz (onda plana en nuestro caso), debido a que no hay un acople entre la onda de luz y la simetría de los modos plasmónicos. En cuanto al tercer modo en EELS, no es posible precisar que este corresponda al modo de óptica con posición cercana a los 519 nm debido a que existe pequeñas diferencias en las posiciones EELS 1, 2 y 3 que indican que estos modos no son los mismos. Para saber si alguno de ellos posee correspondencia con el modo de óptica se procedió a realizar mapas de carga en la nanopartícula para cada modo encontrado tanto experimentalmente como mediante simulaciones. En el análisis experimental EELS se utilizó Digital Micrograph y para cada pico se realizó el respectivo mapa de señal EELS (la cual es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico). Los mapas EELS experimentales se muestran en la Fig.3.

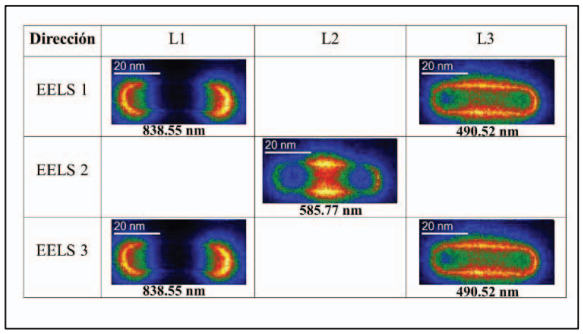


Fig. 3. Mapas EELS experimentales de un nanorod de oro en cada modo registrado según la dirección de incidencia.

El modo L1 posee distribución longitudinal dipolar y está presente en las direcciones EELS 1 y 3, el modo L2 solo está presente en la dirección EELS 2, este también es longitudinal. El modo L3 no es posible identificar a que tipo de modo corresponde, este podría ser la acumulación de modos longitudinales e incluso el modo transversal.

En la Fig.4 vemos los mapas simulados de carga para los diferentes modos tanto en óptica como en EELS. El color rojo representa carga positiva y el azul, negativa. Es evidente que con la luz se puede excitar el modo longitudinal dipolar (polarización X) y el modo transversal (polarización Y). En cuanto a los mapas de carga simulados de EELS también es posible observar que para las direcciones EELS 1 y 3 se excita el modo longitudinal dipolar. El modo L2 es excitado por la dirección 1 y 2 y posee distribuciones de carga con la misma simetría y corresponden a intensidades claras en el centro del nanorod, esto se puede constatar también en el modo L2 de la figura 3. Las distribuciones de carga debido al modo L3 poseen discrepancias para cada una de las direcciones analizadas en este estudio lo que evidencia que no está tan definida, como en los modos anteriores.

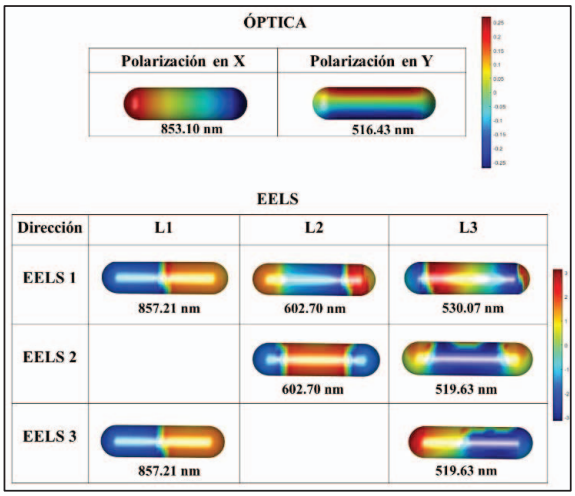


Fig. 4. a) Mapas de carga simulados para los dos modos encontrados en óptica en ambas polarizaciones. b) Mapas de carga EELS simulados para cada dirección de incidencia del haz de electrones.

IV. Conclusiones

La absorbancia medida por espectrofotometría excita el modo transversal y longitudinal en las muestras de nanorods analizadas. En cuanto a los espectros experimentales obtenidos mediante la técnica STEM-EELS se muestra la aparición de tres modos distintos de los cuales el correspondiente a L1 es el modo longitudinal dipolar evidente en los mapas obtenidos, el correspondiente a L2 es otro modo longitudinal evidente también en los mapas obtenidos y el correspondiente a L3 que evidencia una acumulación de modos de orden superior. Los espectros EELS obtenidos mediante simulaciones para un nanorod de oro haciendo incidir el haz de electrones fuera de la nanopartícula muestran la aparición de plasmones de superficie localizados excitados por el campo eléctrico inducido en la nanopartícula por el haz de electrones, los cuales pueden ser comparados con los obtenidos en simulaciones ópticas donde se excita con luz (onda plana). La comparación entre espectros provenientes de simulaciones ópticas y de simulaciones EELS se realizó manteniendo contante las condiciones morfológicas de las

nanopartículas y del medio dieléctrico circundante. La sección eficaz de extinción es proporcional a la probabilidad de pérdida de energía de los electrones, siendo así, hay correspondencia de los picos de resonancia L=1 obtenidos en ambos métodos, los otros picos de resonancia obtenidos en EELS son modos oscuros para la óptica. El modo transversal excitado por luz no es excitado propiamente en EELS debido a que las características de la técnica propician excitar mejor los modos longitudinales. Este trabajo será continuado realizando tomografía STEM-EELS para realizar un mapeo 3D de los diferentes modos plasmónicos y ver si la técnica EELS logra resolver el modo transversal de manera eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Franck Aguilar agradece a SENACYT por los fondos a través del proyecto GC-2019B-04 para la ejecución de esta investigación. Alfredo Campos agradece a la SENACYT, proyecto FID18-066, por el apoyo a esta investigación y al Sistema Nacional de Investigación (SNI). Este Proyecto ha recibido financiamiento del programa de innovación e investigación de la Unión Europea Horizon 2020 bajo el acuerdo de donación No 823717 – ESTEEM3.

REFERENCIAS

[1] M. Bosman, V. J. Keast, M. Watanabe, A. I. Maaroof, y M. B. Cortie, "Mapping surface plasmons at the nanometre scale with an electron beam", Nanotechnology, vol. 18, n.º 16, p. 165505, mar. 2007, doi: 10.1088/0957-4484/18/16/165505.

[2] A. Trügler, Optical Properties of Metallic Nanoparticles: Basic Principles and Simulation. Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-25074-8.

[3] G. F. M. Magdalena, «Apuntes para Espectrometría de Radiación Ultravioleta Visible (Uv/Vis) Material de Apoyo Para Asignatura "Temas Selectos de Química (Analitica)"», oct. 2016, Accedido: 26 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/68318

[4] U. Hohenester y A. Trügler, «MNPBEM - A Matlab toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles», Computer Physics Communications, vol. 183, n.º 2, pp. 370-381, feb. 2012, doi: 10.1016/j.cpc.2011.09.009.

[5] F. J. García de Abajo y A. Howie, «Retarded field calculation of electron energy loss in inhomogeneous dielectrics», Phys. Rev. B, vol. 65, n.º 11, p. 115418, mar. 2002, doi: 10.1103/PhysRevB.65.115418.

[6] J. Waxenegger, A. Trügler, y U. Hohenester, «Plasmonics simulations with the MNPBEM toolbox: Consideration of substrates and layer structures», Computer Physics Communications, ago. 2015, doi: 10.1016/J.CPC.2015.03.023.

[7] A. Campos, «Optics and structure of metal clusters at the atomic scale», 2018. Université Paris Saclay (COmUE).

[8] M. Kobylko et al., «Localized Plasmonic Resonances of Prolate Nanoparticles in a Symmetric Environment: Experimental Verification of the Accuracy of Numerical and Analytical Models», Phys. Rev. Applied, vol. 9, n.º 6, p. 064038, jun. 2018, doi: 10.1103/PhysRevApplied.9.064038

[9] F. de la Peña et al., «hyperspy/hyperspy: Release v1.7.1». Zenodo, 18 de junio de 2022. doi: 10.5281/zenodo.6659919.

Study of electrical, optical and structural properties of SnO2:F thin films prepared by spray pyrolisis

Estudio de las propiedades eléctricas, ópticas y estructurales de películas delgadas de SnO2:F

Ángel Crredidío
Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
angel.credidio2@utp.ac.pa

Hector Miranda
Departamento de Ciencias Naturales,
Laboratorio Pierre & Marie Curie
Facultad de Ciencia y Tecnología,
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
hector.miranda@utp.ac.pa

Amanda Watson
Departamento de Ciencias Naturales,
Laboratorio Pierre & Marie Curie
Facultad de Ciencia y Tecnología,
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
amanda.watson@utp.ac.pa

Carlos Ariel Samudio
Departamento de Geología
Universidad de Passo Fundo
Passo Fundo, Brasil
samudio@upf.br

Joao Carlos Krause
Departamento de Ciencias Exactas y de la Tierra
Universidad Regional Integrada del Alto Uruguay y las Misiones
Santo Angelo, Brasil
krause@san.uri.br

Eleicer Ching-Prado
Departamento de Ciencias Naturales,
Laboratorio Pierre & Marie Curie
Facultad de Ciencia y Tecnología,
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
eleicer.ching@utp.ac.pa

***Abstract*— A film of SnO_2:F (FTO) was deposited on a glass substrate using the pyrolytic spray technique. The solution used was composed of tin dichloride ($SnCl_2 \cdot 2H_2O$) as solution precursor; ammonium fluoride (NH_4F); and water and isopropyl alcohol as solvents. The film was deposited at a temperature of 475°C. The influence of using isopropyl alcohol as a solvent was studied. The optical properties of the film were analyzed using the UV-visible spectrum and fitted using the classic Drude-Lorentz dispersion model. The electrical measurements were obtained by the Hall Effect technique. The effects on the structure were studied using X-ray diffraction. The FTO sample was compared with the one with the best figure of merit prepared in a previous investigation at the Pierre et Marie Curie Laboratory in which only water was used as a solvent. The average optical transmission in the visible region was 79.94%. The fit by the Drude-Lorentz model showed that the thickness of the film is 417.57 nm, and the bandgap energy is 4.68 eV. The Hall Effect measurement yielded a conductivity of 14.31 x 10^2 Ωcm^-1 and a figure of merit of 10.91 x 10-3 Ω^-1. Structurally it is of the tetragonal of the cassiterite type and polycrystalline in nature.**

Keywords—FTO, tin oxide, thin film, spray pyrolysis, electrical resistivity, semiconductor, TCO, figure of merit.

***Resumen* — Fue depositada una película de SnO_2:F (FTO) sobre un sustrato de vidrio mediante la técnica de rocío pirolítico. La solución utilizada estuvo compuesta por dicloruro de estaño ($SnCl_2 \cdot 2H_2O$) como precursor de la solución; fluoruro de amonio (NH4F); y agua y alcohol isopropílico como solventes. La película se depositó a una de temperatura de 475°C. Se estudió la influencia de utilizar alcohol isopropílico como solvente. Las propiedades ópticas de la película fueron analizadas utilizando el espectro UV-visible y fue ajustado utilizando el modelo de dispersión clásica de Drude-Lorentz. Las medidas eléctricas se obtuvieron por la técnica de Efecto Hall. Los efectos en la estructura fueron estudiados utilizando difracción de rayos X. La muestra de FTO se comparó con la de mejor figura de mérito preparada en una investigación previa en el Laboratorio Pierre y Marie Curie en la que se utilizó solamente agua como solvente. La transmisión óptica promedio en la región visible fue de 79.94 %. El ajuste por el modelo de Drude-Lorentz mostró que el espesor de la película es de 417.57 nm y la energía de banda prohibida es de 4.68 eV. La medida por Efecto Hall arrojó una conductividad de 14.31 x 10^2 Ωcm^-1 y una figura de mérito de 10.91 x 10-3 Ω^-1. Estructuralmente es tetragonal del tipo casiterita y naturaleza policristalina.**

Palabras claves —FTO, óxido de estaño, película delgada, rocío pirolítico, resistividad eléctrica, semiconductor, TCO, figura de mérito.

I. Introducción

Los óxidos conductores transparentes TCO's (*Transparent conductive oxides*) son compuestos óxidos metálicos que tienen propiedades semiconductoras. Estos están en el foco de la comunidad científica por presentar alta transparencia óptica en la región visible (≥85%) y elevada conductividad eléctrica (≥10^{-3}Ω/cm), propiedades que hacen a estos materiales muy útiles para aplicaciones optoelectrónicas como celdas solares sensibilizadas (DSSC) [1], sensores de gases [2], pantallas táctiles [3], ventanas de baja emisividad, diodos emisores de luz orgánicos (OLEDS), entre otras.

Actualmente, el TCO estándar en la industria es el In_2O_3:Sn (ITO), sin embargo, el indio ha tenido un gran aumento en costo debido a su escasez. El SnO_2 ha sido muy estudiado como sustituto para el ITO en la industria porque permite fabricar películas delgadas con baja resistividad y alta transmitancia óptica. Además, sus propiedades se pueden modificar significativamente utilizando dopaje con distintos elementos como flúor (F), antimonio (Sb), cobalto (Co), cerio (Ce), hierro (Fe), paladio (Pd), niobio (Nb), entre otros. En el SnO_2:F (FTO) el dopaje con F^- mejora la conductividad eléctrica del SnO_2 porque introduce un mayor número de portadores reemplazando iones de O^{2-} con F^- generando exceso de electrones en el material, convirtiéndolo en un semiconductor degenerado y reduciendo su resistividad [4]. Aunado a esto, el FTO cuenta con una buena estabilidad química, excelente resistencia mecánica y térmica, y bajo costo de preparación [5].

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00128

Se han fabricado películas de FTO mediante distintas técnicas: deposición por capas atómicas "atomic layer deposition" (ALD), deposición por láser pulsado "pulse laser deposition" (PLD) [6], deposición química de vapor "chemical vapor deposition" (CVD) [7]. Estas tienen la particularidad de necesitar equipo y tecnología muy especializada que conlleva un alto costo. Debido a esto, en los últimos años, se han popularizado las técnicas de química liquida (QL) que se pueden realizar a costo mucho más reducido. Entre esas podemos mencionar: el recubrimiento por giro "spin coating" (SC) [8], la deposición por inmersión "deep coating" (DC) y la deposición por rocío pirolítico "spray pyrolysis" (SP) [9] [10] [11]. Esta última ha sido muy utilizada en la preparación de una gran variedad de materiales nanoestructurados [4].

Se ha observado, en muchos resultados publicados, que las propiedades eléctricas, estructurales y ópticas de las películas de FTO dependen en gran medida de las condiciones de deposición. Se busca que la transmitancia óptica y la conductividad eléctrica sean lo más altas posible. Sin embargo, una película de estas características, en el mayor de los casos, es imposible de lograr [12]. En busca de mejorar las propiedades del FTO también se ha estudiado la influencia de distintos solventes: agua, 2-propanol [13] [14], etanol, metanol [15], peróxido de hidrogeno [16], entre otros. En este trabajo se preparó una película delgada de FTO sobre un sustrato de vidrio mediante la técnica de SP. En particular, se estudia el efecto de agregar 2-propanol como solvente en la solución y comparar las propiedades obtenidas con las de una película de FTO fabricada y caracterizada previamente en el Laboratorio Pierre et Marie Curie que solo tenía agua como solvente [4].

II. Materiales y Métodos

Películas delgadas de FTO fueron depositadas sobre sustratos de vidrio utilizando la técnica de SP. El equipo de crecimiento de la película cuenta con un sistema de control programable que permite ajustar electrónicamente la temperatura del sustrato, el movimiento longitudinal de la boquilla de atomización y el flujo de gas. Como sustrato, se utilizó porta muestras de vidrio de 10.0 x 25.4 x 1.0 mm. La limpieza de estos sustratos se hizo con jabón en polvo restregado con guantes, agua de la pluma para aclarar y luego agua destilada para quitar residuos. Después de la limpieza, los sustratos se secaron en platos calientes a 250 °C.

La solución precursora se preparó disolviendo 4.0053 g de $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ (*Merk reagent grade*) y 0.6006 g de NH_4F (*95%, grado ACS, Merck*) en 30 mL de agua destilada, en una proporción de F/Sn = 0.15 wt. Luego, se colocó en un

TABLA 1. Valores del ángulo de Bragg, índices de Miller (hkl), distancia interplanar (d), el coeficiente de textura $TC_{(hkl)}$, las constantes de red (a,c), el volumen y tamaño de esta. Los datos en paréntesis corresponden a la investigación realizada con anterioridad en el Laboratorio Pierre & Marie Curie [4].

2θ (°)	hkl	d_{hkl} (Å)	$TC_{(hkl)}$	a=b (Å)	D (nm)
26.77	110	3.32969 ± 0.00027 (3.350)	0.14881 (1.914)	4.72483 ± 0.00037 (4.74651 ± 0.00000)	62.12097 (42.81)
38.11	200	2.35846 ± 0.00008 (2.369)	4.0748 (2.097)		
51.84	211	1.761 ± 0.00008 (1.764)	0.52352 (1.0808)	**c (Å)**	**ε (%)**
81.15	400	1.183 ± 0.00005	1.67568	3.18584 ± 0.00244 (3.19737 ± 0.00012)	0.178

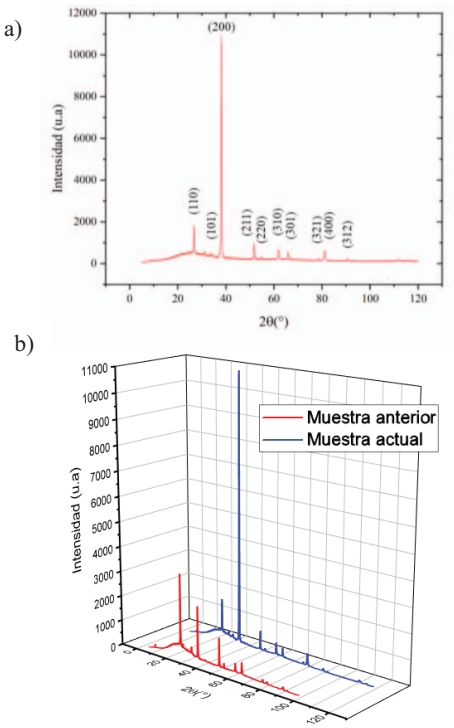


Fig. 1. a) Espectro XRD de la película delgada de FTO sintetizada mediante SP, con los planos que corresponden a cada tipo. b) Comparación del especto XRD de la muestra actual con la muestra anterior fabricada en el Laboratorio Pierre et Marie Curie.

La caracterización óptica se realizó con un espectrómetro UV-Visible Shimadzu, modelo UV-100 en un rango especial de 190-1100 nm. El espectro de transmitancia se ajustó utilizando el modelo de dispersión clásico de Drude-Lorentz, mediante el código de programa RefFIT [17]. La caracterización eléctrica se realizó a través de mediciones de Efecto Hall utilizando un equipo Scopia modelo HMS-3000. La descripción nanoestructural de la muestra se realizó usando la técnica de difracción de rayos X (*XRD-MiniFlex-600 Rigaku*) con longitud de onda de 1.54059 Å, que brinda los planos cristalinos de la estructura, y estos datos fueron ajustados con el Software Origin®.

III. Resultados y Discusión

A. *Propiedades estructurales*

El patrón de difracción de rayos X (XRD) de la película de FTO, se muestra en la Fig. 1a. Como se puede observar, la película tiene un pico de máxima intensidad en 37.91° plano (200). A este lo acompañan picos de difracción correspondientes a las posiciones de Bragg y planos de reflexión de 26.58° plano (110); 33.88° plano (101); 51.72° plano (211); 54.76° plano (220), 61.89° plano (310); 65.97° plano (301), típicos de la fase rutilo del SnO_2 y el plano (321) en 78.72°.

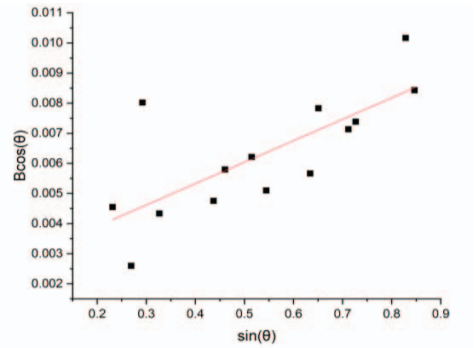


Fig. 2. Gráfica de Williamson-Hall para el cálculo del tamaño del grano (D) y la deformación (ε).

Estos picos indican la formación de la estructura policristalina del SnO_2, de tipo tetragonal casiterita [18]. Para cuantificar la intensidad de los picos se calculó el coeficiente de textura (*TC)* para los planos mencionados anteriormente, utilizando la siguiente ecuación (1) [19]:

$$TC_{(hkl)} = \frac{I_{(hkl)}}{I_{0(hkl)}} \times \left[\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{I_{(hkl)}}{I_{0(hkl)}}\right] \quad (1)$$

Donde $TC_{(hkl)}$ el coeficiente de textura del plano (hkl), $I_{(hkl)}$ y $I_{0(hkl)}$ son las intensidades de los picos medidos y teóricos, respectivamente, (hkl) son los índices de Miller, y n es el número de picos tomados en consideración. En la TABLA 1 se presentan los coeficientes de textura correspondientes a los picos (110), (200), (211) y (400). Estos resultados revelan la presencia de dos direcciones preferenciales de crecimiento texturizadas (TC>1) en la estructura del FTO. En la muestra analizada, el valor de $TC_{(200)} = 4.0748$ es considerablemente más alto en comparación con los otros planos, lo que evidencia que los cristales crecen preferiblemente en esta dirección. Este resultado es consistente con el reportado por otros autores, que señalan que el dopaje con flúor influye, sobre todo en el pico correspondiente al plano (200). En investigaciones previas [20] se ha determinado que es más probable un crecimiento del pico (200) en ambientes ricos en halógenos como el flúor y el cloro, ambos presentes en la solución precursora utilizada para fabricar la muestra de FTO. En la Fig. 1b se muestra el patrón XRD de la mejor película fabricada anteriormente en Laboratorio Pierre et Marie Curie [4] y de la muestra estudiada en la presente investigación. Una primera revisión de esta deja en evidencia que utilizar 2-propanol a la solución contribuye a la disminución de los picos (110), (101) y (211); y al aumento del pico (200).

Además, el tamaño del cristal (*D*) y la deformación (ε) de la muestra preparada fueron estimados utilizando el método de Williamson-Hall:

$$\beta_{tot}\cos\theta = 4\varepsilon\,\mathrm{sen}\,\theta + \frac{K\lambda}{D} \quad (2)$$

donde β_{tot} es la anchura a media altura, abreviada FWHM "Full Width at Half Maximum" que representa un determinado pico de emisión, θ es el ángulo de Bragg, *K* es una constante muy cercana a la unidad y λ es la longitud de onda del XRD (1.54059 Å). El valor de β_{tot} fue corregido con una muestra de Silicio para quitar el aporte de los parámetros instrumentales, utilizando la relación (3):

$$\beta^2 = \beta_{a^-}^2 - b^2 \quad (3)$$

donde β_{a^-} corresponde al FWHM observado y *b* corresponde al FWHM instrumental.

D y ε son estimados de la gráfica de $\beta_{tot}\cos\theta$ versus $\mathrm{sen}\,\theta$ calculados para diferentes picos. La intercepción de la gráfica con el eje "y" representa el tamaño del cristal, y la pendiente de esta representa la deformación. Esta gráfica se presenta en la Fig. 2. Los valores de FWHM se obtuvieron mediante el ajuste de los datos de XRD con el software Origin®, utilizando una función Gaussiana.

Las constantes de red "a", "c" de la estructura tetragonal del FTO fueron calculadas utilizando los resultados del XRD correspondientes a los planos (200) y (211) [21], utilizando la ecuación (4):

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2+k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4)$$

donde $d_{(hkl)}$ es la distancia interplanar. En la TABLA *1* se presentan los resultados.

B. Propiedades ópticas y eléctricas

La Fig. 3 muestra el espectro de transmitancia óptica de la película de FTO sobre el sustrato de vidrio. El patrón de interferencia bien desarrollado en la región de alta transmitancia indica que la película tiene una superficie suave con interfaces aire-FTO y FTO-sustratos bien definidas y que la película es morfológicamente homogénea [22]. El espectro de transmitancia es fundamental para evaluar cualitativamente la calidad de la película y, además, para estimar el grosor de esta. Esto está expuesto en el modelo de envolventes propuesto originalmente por Manifacier et al. [23], que luego desarrolló Swanepoel [24]. El espectro mostrado fue ajustado utilizando la teoría de dispersión clásica de multicapas de Drude-Lorentz (D-L), descrita por la ecuación (5):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} + \sum_k \frac{\omega_{pk}^2}{\omega_{0k}^2 - \omega^2 - i\gamma_k\omega} \quad (5)$$

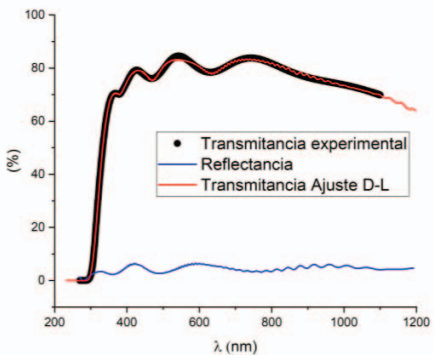


Fig. 3. Espectros de transmitancia de FTO medido y ajustado. El espectro de reflectancia se obtiene utilizando los parámetros de ajuste de la función dieléctrica.

TABLA 2. VALORES OBTENIDOS DE LA RESISTIVIDAD (ρ), LA MOVILIDAD DE HALL (μ), LA RESISTENCIA LAMINAR (R_s), LA DENSIDAD DE PORTADORES (n), EL PROMEDIO DE TRANSMITANCIA EN EL RANGO VISIBLE (380-750nm) (T_m), EL VALOR DE LA TRANSMITANCIA A 550 nm (T), LA FIGURA DE MÉRITO PARA EL RANGO VISIBLE (ϕ_m) Y LA FIGURA DE MÉRITO A 550 nm (ϕ). LOS DATOS EN PARÉNTESIS CORRESPONDEN A LA INVESTIGACIÓN REALIZADA CON ANTERIORIDAD EN EL LABORATORIO PIERRE & MARIE CURIE [4].

ρ (x 10^{-4} Ωcm)	μ (cm^2/Vs)	R_s (Ω sq)	n (x 10^{20} cm^{-3})	T_m(380-750nm)	T (550 nm)	ϕ_m (x 10^{-3} Ω^{-1})	ϕ (x 10^{-3} Ω^{-1})
6.987 (9.9)	21.085 (11.52)	16.73	4.242 (5.41)	79.94% (81.3%)	84.36%	6.37 (5.17)	10.92

donde ε_∞ representa la constante dieléctrica a alta frecuencia ($\varepsilon_\infty = 1$ en metales). El segundo término es el oscilador de Drude, que representa las propiedades de conductividad eléctrica del material (σ), el tercer término es el oscilador de Lorentz, que describe la energía de banda prohibida del material. ω_{0k} es la frecuencia de oscilación de los electrones ligados a un potencial bajo la presencia de un campo eléctrico, ω_{pk} y γ_k son la frecuencia de plasma y el coeficiente de amortiguamiento correspondientes al k-ésimo oscilador de Lorentz, respectivamente.

El ajuste del espectro de transmitancia mediante D-L permitió estimar el espesor de la película (d) y la transmisión promedio (T) en la región visible (380-750 nm), los cuales fueron de 417.57 nm y 79.94 %, respectivamente. Además, el ajuste D-L también permite calcular la reflectancia experimental del FTO, que aparece en la . Se observó que la reflectancia tiene un comportamiento armónico y baja intensidad en el rango espectral de 190 a 1100 nm, lo cual concuerda con los espectros de reflectancia experimental documentados en la literatura [25].

El ancho de banda prohibida "band gap" de la muestra de FTO depositada fue estimada utilizando la relación de Tauc (6) [25]:

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \qquad (6)$$

donde A es una constante, $h\nu$ es la energía del fotón, E_g es el ancho de banda prohibida, n es igual a $1/2$ y α es el coeficiente de absorción, que puede ser calculado utilizando el espesor de la muestra (t), la transmitancia (T) y la reflectancia (R) mediante la relación (7) [26]:

$$\alpha = \frac{1}{t} ln\left[\frac{(1-R^2)}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2}\right] \qquad (7)$$

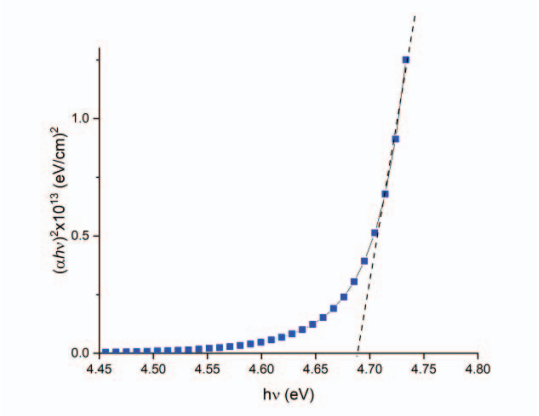


Fig. 4. Gráfica de $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ para la estimación del ancho de banda prohibida de la muestra de FTO.

Por lo tanto, el ancho de banda prohibida puede estimarse extrapolando la parte linear de $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ hacia $(\alpha h\nu)^2 = 0$ [18]. El ancho de banda prohibida (E_g) estimado es de 4.68 eV. Esto se puede ver en la Fig. 4. La Fig. 5 muestra las partes real e imaginaria de la función dieléctrica de la muestra de FTO fabricada en este estudio, donde se pueden observar bandas centradas en 0.00, 2.00, 2.62, 3.24 y 4.00 eV. La banda en 0.00 eV corresponde a una transición intrabanda de electrones que se encuentran en la banda de conducción debido a vacancias de oxígeno y sustitución de O^{-2} por F^{-1}. La banda alrededor de 4.00 eV representa la transición inter-banda de la banda prohibida óptica, que relaciona la banda de valencia con estados desocupados en la banda de conducción. Las otras bandas (2.00, 2.62 y 3.24 eV) pueden, posiblemente, deberse a transiciones de la banda de valencia a estados dentro de la banda prohibida, debido a las vacancias de oxígenos y a impurezas en la muestra. Es decir, se corresponde con transiciones desde el máximo o de la banda de valencia ($O2p$) a trampas neutras o con cargas positivas que se encuentren dentro de la banda prohibida [27].

La resistividad (ρ) , la resistencia laminar (R_S) la movilidad de Hall (μ), la concentración de portadores (n), y otros parámetros eléctricos de interés, fueron determinados realizando mediciones de Efecto Hall. Se pueden observar en la TABLA 2.

Una vez conocidas la resistencia laminar y la transmisión óptica de la película, es posible calcular un parámetro usado para definir la calidad de los TCO's, que además juega un rol fundamental en aplicaciones en celdas solares. Este parámetro se conoce como figura de mérito ($Ø_M$) y se determina utilizando la ecuación de Haacke (8) [28]:

$$\phi_M = \frac{T^{10}}{R_S} \qquad (8)$$

La transmitancia puede tomarse a λ =550 nm [13] o bien se puede considerar el promedio de transmitancia en el rango visible del espectro electromagnético (380-750 nm). Ambos

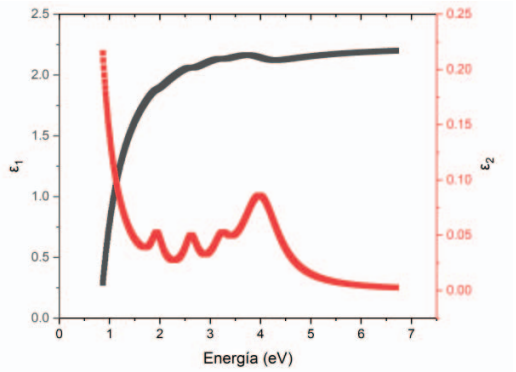


Fig. 5. Espectros de la función dieléctrica imaginaria y real obtenidos a partir del ajuste con el modelo D-L del espectro de transmisión en la región UV-visible.

valores de transmitancia y de las figuras de mérito que generan se presentan en la TABLA 2. Algunos autores [13] sugieren que la preparación con 2-propanol reduce la resistencia laminar debido a un aumento del tamaño del grano, lo que reduce la barrera de potencial y una disminución de las barreras intra-grano e inter-grano.

Además, la figura de mérito encontrada, bajo las condiciones de preparación empleadas en este trabajo, es superior a las documentadas antes en el Laboratorio Pierre et Marie Curie [4]. La figura de mérito obtenida también es comparable con la que se encuentra en investigaciones previas de otros autores [26].

IV. CONCLUSIONES

Se preparó una película delgada de FTO utilizando la técnica de rocío pirolítico. Estructuralmente, la película tiene una naturaleza policristalina con estructura del tipo casiterita. El método de Williamson-Hall permitió estimar un tamaño aparente del grano de 62.12097 y una micro tensión residual en porcentaje de 0.178 %, la que puede estar asociada con la diferencia de expansión térmica entre la película y el sustrato. El análisis óptico mostró una transmitancia promedio en la región visible de 79.94 %, y 84.36% a 550 nm. El ajuste del espectro de transmitancia con el modelo de dispersión clásica de Drude-Lorentz reveló que el espesor de la película y la energía de banda prohibida es de 417.57 nm y 4.68 eV, respectivamente. Las características ópticas y eléctricas de la película fabricada en este estudio la hacen óptima para aplicaciones optoelectrónicas.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a SENACYT (proyecto FID2021-55) por el financiamiento. También agradecen al Departamento de Ciencias Exactas y de la Tierra de la Universidad Regional Integrada de Alto Uruguay y las Misiones (DCET-URI) en Brasil, por las mediciones de XRD realizadas.

REFERENCES

[1] A. Koçyiğit y G. Kerimli, «The characterization of various TCOs and metal oxide layers for dye,» *Materials Today: Proceedings,* vol. 46, pp. 6947-6953, 2021.

[2] M. R. Vaezi y S. K. Sadrnezhaad, «Gas sensing behavior of nanostructured sensors based on tin oxide synthesized with different methods,» *Materials Science and Engineering B,* vol. 140, pp. 73-80, 2007.

[3] J. Kim, S. Wong, G. Kim, Y.-B. Park, J. van Embden y E. Della Gaspera, «Transparent electrodes based on spray coated fluorine-doped tin oxide with enhanced optical, electrical and mechanical properties,» *Journal of Materials Chemistry C,* vol. 8, nº 41, pp. 14531-14539, 2020.

[4] H. Miranda, S. Velumani, C. A. Samudio Pérez, J. C. Krause, F. D' Souza, E. De Obaldía y E. Ching-Prado, «Effects of changes on temperature and fluorine concentration in the structural, optical and electrical properties of SnO2:F thin films,» *Journal of Material Science: Materials in Electronics,* vol. 30, nº 16, pp. 15563-15581, Julio 2019.

[5] E. Ching-Prado, C. A. Samudio, J. Santiago-Aviles y S. Velumani, «Electronic structure and optical properties of SnO2:F from PBE0 hybrid functional calculations,» *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* vol. 29, nº 18, pp. 15423-15435, 2018.

[6] R. A. A. P. H. Kim, «F-doped SnO2 thin films grown on flexible substrates at low temperatures by pulsed laser deposition,» *Thin Solid Films,* vol. 520, pp. 497-500, 2011.

[7] X. L. S. X. H. Z. J. N. W. L. P. K. D. S. P. M. R. M. H. K. T. Jian Tao Wang, «Morphology control of fluorine-doped tin oxide thin films for enhanced light trapping,» *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 132, pp. 578-588, 2015.

[8] H. A. S. E. M. D. T. S. Amr Attia Abuelwafa, «Quantum computational, linear and non-linear optical properties of spin-coated nickel (II)-tetraphenylporphyrin/FTO thin films,» *Optik - International Journal for Light and Electron Optics,* vol. 234, p. 166618, 2021.

[9] M. O. Basar Suer, «Conducting fluorine doped tin dioxide (FTO) coatings by ultrasonic spray pyrolysis for heating applications,» *Ceramics International,* vol. 47, pp. 17245-17254, 2021.

[10] N. D. S. K. A. K. Edirisinghage V A PREMALAL, «Development of Quality FTO Films by Spray Pyrolysis for Dye-Sensitized Solar Cell,» *Electrochemistry,* vol. 80, pp. 624-628, 2012.

[11] A. A. H. s. A. Y. M. D. Chafia Khelifi, «Investigation of F doped SnO2 thin films properties deposited via ultrasonic spray technique for several applications,» *Surfaces and Interfaces,* vol. 15, pp. 244-249, 2019.

[12] F. J. D. l. H.-W. R. R. A. Oleksandr Malik, «Fluorine-doped tin oxide films with a high figure of merit fabricated by spray pyrolysis,» *Journal of Materials Research,* vol. 30, nº 13, pp. 2040-2045, 2015.

[13] A. V. Moholkar, S. M. Pawar, K. Y. Rajpure y C. H. Bhosale, «Effect of solvent ratio on the properties of highly oriented sprayed fluorine-doped tin oxide thin films,» *Materials,* vol. 61, nº 14-15, pp. 3030-3036, 2017.

[14] A. E. Hassanien, H. M. Hashem, G. Kamel, S. Soltan, A. M. Moustafa, M. Hamman y A. A. Ramadan, «Performance of Transparent Conducting Fluorine-doped Tin oxide films for applications in energy efficient devices,» *International Journal of Thin Films Science and Technology,* vol. 5, nº 1, pp. 55-65, Enero 2016.

[15] T. A. L. H. L. N. S. G. R. A. N. F. F. L. A. A. S. Akhmad Herman Yuwono, «The Effect of Various Precursors and Solvents on the Characteristics of Fluorine-doped Tin Oxide Conducting Glass Fabricated by Ultrasonic Spray Pyrolysis,» *International Journal of Technology,* vol. 8, p. 1336, 2017.

[16] J. Yu, L. Wang, X. Niu, L. Wang, J. Yang y H. Zhao, «Effect of hydrogen peroxide on photoelectric properties of high-transmittance FTO films prepared by

spray pyrolysis,» *Surface and Coatings Technology,* vol. 361, pp. 308-313, 2019.

[17] A. B. Kuzmenko, «RefFIT-The software,» 2004. [En línea]. Available: https://reffit.ch/software/.

[18] S. M. R. Hassan Zare Asl, «Influence of texture coefficient on the electrical properties of spray-deposited fluorine-doped tin oxide thin film,» *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* vol. 32, nº 2, pp. 1668-1676, Enero 2021.

[19] N. P. R. R. S. J. M. F. D. B. P. G. M. M. K. G. V. G. L. M. B. D. P. J. Reddivari Muniramaiah, «Solvent effect on the optoelectronic properties of fluorine doped SnO2 thin films prepared by spray-pyrolysis,» *Surfaces and Interfaces,* p. 102174, 2022.

[20] X. L. S. W. W. L. X. H. Z. J. N. W. L. P. K. D. S. P. M. R. M. H. K. T. Jian Tao Wang, «Influence of Preferred Orientation on the Electrical Conductivity of Fluorine-Doped Tin Oxide Films,» *Scientific Reports,* vol. 4, 2014.

[21] M. L. Z. N. A. M. S. A. Amel Adjimi, «Fluorine-Doped Tin Oxide Thin Films Deposition by Sol-Gel Technique,» *Journal of Crystallization Process and Technology,* vol. 08, nº 04, pp. 89-106, 2018.

[22] H. Miranda y E. Ching-Prado, «Physical properties of semiconductor TCO-SnO2:F thin film,» de *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference*, Panamá, 2019.

[23] J. G. y. J. P. F. J. C. Manifacier, «A simple method for the determination of the optical constants n, k and the thickness of a weakly absorbing thin film,» *Journal of Physics E: Scientific Instruments,* vol. 9, nº 11, pp. 1002-1004, 1976.

[24] R. Swanepoel, «Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon,» *Journal of Physics E: Scientific Instruments,* vol. 16, nº 12, pp. 1214-1222, 1983.

[25] M. C. N. K. T. Mejda Ajili, «Spray solution flow rate effect on growth, optoelectronic characteristics and photoluminescence of SnO2:F thin films for photovoltaic application,» *Optik,* vol. 126, nº 7-8, pp. 708-714, 2015.

[26] S. M. R. Hassan Zare Asl, «High-quality spray-deposited fluorine-doped tin oxide: effect of film thickness on structural, morphological, electrical, and optical properties,» *Applied Physics A,* vol. 125, nº 689, 2019.

[27] E. Ching-Prado, H. Miranda y A. Watson, «Optical properties of SnO2 y SnO2: F-an experimental and theoterical approach,» de *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, Panama, Panama, 2019.

[28] G. Haacke, «New figure of merit for transparent conductors,» *Journal of Applied Physics,* vol. 47, pp. 4086-4089, 1976.

[29] F. S. R. D. Debojyoti Nath, «X-ray diffraction analysis by Williamson-Hall, Halder-Wagner and size-strain plot methods of CdSe nanoparticles- a comparative study,» *Materials Chemistry and Physics,* vol. 239, p. 122021, 2020.

Tidal local gravity effects measured by remote controlled pendulums

Horacio Fernandes
Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Lisbon, Portugal
hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Pedro A. Mendes Rossa
Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Lisbon, Portugal
pedro.rossa@tecnico.ulisboa.pt

Manuel Santos
Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Lisbon, Portugal
manuelbbsantos@tecnico.ulisboa.pt

Rafael Henriques
Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Lisbon, Portugal
rhenriques@ipfn.ist.utl.pt

Bernhard Georg Enders
FUP Faculdade UNB Planaltina
Universidade de Brasilia
Brasilia, Brazil
bgeneto@gmail.com

Paulo Eduardo de Brito
FUP Faculdade UNB Planaltina
Universidade de Brasilia
Brasilia, Brazil
pedebrito@gmail.com

Daniel Fernando Gomez-Barrera
Dpto. de Ingeniería Mecánica
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
df.gomezb@uniandes.edu.co

Carlos F. Rodríguez
Dpto. de Ingeniería Mecánica,
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
crodrigu@uniandes.edu.co

Juan Gabriel Ramirez
Departamento de Física
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
jgramirez@uniandes.edu.co

***Abstract*— The gravitational effects of the Moon on the Earth are verifiable in many different natural systems. Some have pronounced and visible effects, like tides, although others are more subtle in nature, like atmospheric tides or crustal tides.**

In this paper, the orbital period of the Moon is determined by studying one of the more subtle effects of the Earth-Moon-Sun gravitational interaction, the variation of local gravity at the Earth's surface as a function of the position of the Moon in its orbit. For this purpose, we use a set of remote controlled pendulums at different longitudes. The pendulums are part of the constellation displayed by the World Pendulum Alliance project. The spatial distribution of these accurate apparatus allows the experimental study of the variation of gravitational acceleration at the Earth's surface as a function of latitude. In this paper, we show the experimental verification of the variation of the period of the pendulum as a function of the phase of the Moon and, consequently, the determination of the period of the Moon's orbit around the Earth.

Keywords*— Educational technology, local gravity, pendulum, remote controlled laboratory, tidal perturbations.

I. Introduction

The "World Pendulum Alliance" (WP@ELAB) [1], [2] is a project initially designed to map Earth's gravity. To do so, a network of especially designed, remotely accessible pendulums, built to have the necessary precision to measure the expected variation of the gravity constant, were distributed over locations spread in several latitudes [3]. When used together, this set of pendulums forms a single, physically distributed experimental apparatus. Nevertheless, each single apparatus can be used as a "normal" single pendulum to pursue the usual physics studies [4]. Using a single apparatus, it is possible to, e.g., study the difference between the simple pendulum approach and the physical pendulum, where moment of inertia has to be taken in consideration, and other effects, such as the variation in local gravity due to the attraction forces of the moon and the sun.

All the apparatus part of the "World Pendulum Alliance" are real, remotely controllable, experimental setups. Remotely accessible computer simulations can be helpful tools in the understanding of specific topics in physics, with lower entry barriers than designing, building and setting up an experimental apparatus, but they have significant drawbacks when compared to the wealth of data a real experimental setup can generated. For instance, computer simulations always return data following the pre-programmed models. More advanced models can simulate the variability of real physical systems by adding non-deterministic, random variables to the output computation [5], so that consecutive executions do not return the exact same results. Still, these random variables tend to be governed by easily modeled probability density functions, and are therefore easily accounted for during data analysis. On the contrary, real experimental apparatus not only have the richness of experimental uncertainties that frequently are difficult to

This work is a result of the project WP@ELAB WORLD PENDULUM ALLIANCE, funded by the EU Erasmus+ program under the grant agreement 598929-EPP-1-2018-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00129

explain, model and account for during data analysis, but can also exhibit an ever-deepening variety of other physical phenomena that subtly influence the results and that can emerge from the experimental results as the measurement precision increases. This dynamic cannot be replicated using pre-programmed computer models.

The pendulum, understood as an oscillating mass tied to a point though a restraining element is one of the simplest physical apparatus that can be assembled and, commonly, one of the first to be introduced to students. A pendulum is a system under the action of a primary force that produces a harmonic movement, and several secondary forces that damp and modify this movement. This primary force is the weight of the mass, which is dependent at first order upon the specific value of the local gravitational acceleration.

Tides are long-period waves that roll around the planet as the ocean is "pulled" back and forth by the gravitational pull of the Moon and the Sun, as these bodies interact with the Earth in their monthly and yearly orbits. Spring tides occur twice each lunar month all year long, without regard to the season, when the three bodies are aligned as pictured in Figure 1. In this situation, it is well known that the tidal bulge originated by the sun reinforces the bulge from the moon, creating a higher effect on the gravity fluctuation within a day. Because the moon travels ~12º a day, the main harmonic relates to a period slightly higher than 12h (~745 min). This suggests that there will be an harmonic of the gravity around 1.9 occurrences a day.

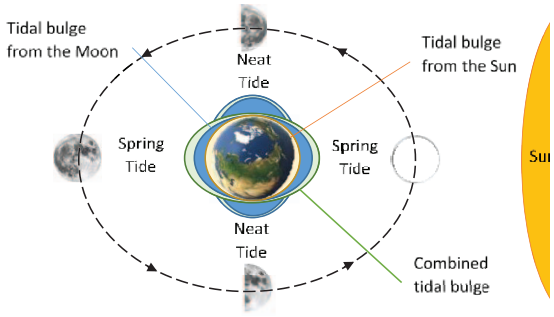


Fig. 1. Effects of the Moon and Sun on tides. The gravitational force of the Moon is the main cause of high and low tides. The contribution of the Sun and the relative positioning of the 3 bodies create the phenomena of spring tides and neap tides whose contribution for the energy peak on the power spectrum can be useful to demonstrate the gravitational perturbation considering different time windows.

During full or new moons, which occur when, the Earth, Sun, and Moon are nearly in alignment—average tidal spans are larger. This occurs roughly twice each month, roughly once every 12.25 days. In both cases, the gravitational pull of the sun is "added" to the gravitational pull of the moon on Earth, causing the oceans to bulge a bit larger than usual. This means that high tides are higher and low tides are lower than average.

For this work, data was collected in Brasilia and in Bogota during different periods of the year. In both cases, each gravity point is computed from an average of 50 transit times from an acquisition taken every 12 or 23 minutes, allowing for a sample rate of 60 or 120 acquisitions per day (~128 in a lunar day). In the future, several distributed experiments performed synchronously can be included in the analysis, allowing accounting for the Moon's declination, which varies from −28° to +28°, by comparing pendulums in several latitudes [6], [7]. Nevertheless, for this paper we focus on obtaining the local acceleration due to gravity in locations previously mentioned.

The paper begins with the description of the experimental setup installed in each of the selected locations. Then the results obtained by the pendulum in Brasilia and in Bogota are described and analyzed. Finally, the fourth section gives a detailed FFT analysis to show evidence for the capability in detecting tidal fluctuations on the local gravity measurements. The main objective of this paper is to bring up one more possible class application with pendulums, aiming to reach students all over the world and bring interest into physics, which is the center of our work.

II. Exérimntal Setup

The “world pendulum experiment” is a set of several pendulums. Each pendulum is equipped with [8]: (i) a very precise sensor able to detect the period of each oscillation with less than 1.5x10-6 relative precision;(ii) a cable of Remanium, a Cobalt-Chromium alloy chosen for its reduced coefficient of thermal expansion (14x10-6 K-1); (iii) a 2 kg spherical bob made of cast iron with 80mm diameter. A dsPIC33F microcontroller controls the experimental apparatus, performs the actual measurements and outputs the results via serial port. A Raspberry Pi (or any computer running Linux) masters the microcontroller, registers the sample data in a straight file with tab separated values from where they can be retrieved from for further analysis, and allows the experiment to be controlled remotely.

A. Hardware description

The microcontroller performs several tasks to automate the experiment, reproducing very closely each experimental run. This makes it possible to have similar conditions, like the setting of the initial oscillation amplitude and time between samples.

Special care was put on the photogate design, located at a height such that it intersects the bob at ¼ diameter, where the flight path is less than one sphere diameter, to allow very small oscillation measurements. The photogate is constituted by a photodiode, placed inside a small pinhole of 1.5 mm diameter and a laser beam impinging on it. The bob travels in-between them, interrupting the laser light periodically. By blocking the laser’s path to the photodiode, the bob causes a change of voltage output of the photodiode, resulting in a change of state at the input pin of the microcontroller, driving an input-compare peripheral.

A laser beam is used to have enough light intensity to avoid any kind of modulation caused by external light sources, such as the sun shining on the photodiode. In fact, if a modulation technique is used, a certain time lag in the signal would show-up and would jeopardize the necessary photogate precision.

The time-base clock is created by a 16xPLL allowing for a 28MHz base frequency. It is then possible to measure the period of the pendulum and the bob velocity at origin by knowing in advance its diameter. Despite the use of a temperature-stable

clock crystal, there are fluctuation errors on the clock in the order of 10^{-5}. Nevertheless, this can be minimized by using a compensation algorithm as temperature is measured simultaneously.

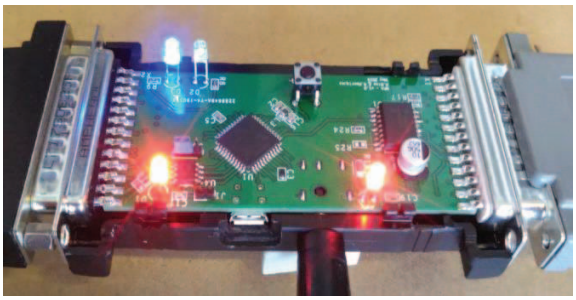


Fig. 2. The developed printed circuit board[9] with D-25 headers: (i) left-hand side connects to the raspberry serial port and (ii) low power source whereas the right-hand side provides all I/O pins and motor drive. A serial USB based on the MAX3349E is provided to interface with other non-TTL level UARTs

B. Communication

The interfacing between the master computer and the microcontroller follows the Generic Drive [10], a serial protocol developed to interface remote laboratories. This protocol assures the synchronization between the state machines existing on both ends and is responsible for transmitting the commands from the microcontroller and returning the sample data.

The initialization process consists in identifying the device, similar to a plug-and-play feature of a computer system by which peripherals are automatically detected and configured by the operating system. The ID string output by the microcontroller assures the correctness of the equipment being used.

After this procedure and if no error is detected, such as a malfunctioning photogate or zero detecting switch, the experiment can be run by the user. The configuration procedure takes place by issuing a command where the initial displacement and number of samples are specified. Afterwards the experiment can be started and at each full oscillation (dual crossing on the photogate), a serial out occurs with the period, velocity at origin and room temperature for later correction.

III. Data Collection and Analysis Procedure

In order to demonstrate that a simple pendulum is capable of achieving precision to evidence tidal occurrences and that the systematic errors are canceled by the nature of differential measures, there is no need to assume an in-depth model for the physics model. It is necessary only to consider the major errors capable of jeopardizing the measurements and that can not be canceled by the differential measures. So far, the only correction showing up to be relevant is the cable length due to thermal expansion.

Data were collected from January 15 until February 15 2022 using a pendulum located at UnB, Brasilia and from June 15 until July 30 2022 using a pendulum located at Uniandes in Bogota. Both experiments are available on the World Pendulum Alliance project, of the elab platform [11], [12] of the Instituto Superior Técnico [13]

A. Data Analysis WEB Interface

A web computational application was developed to collect automatically and process all the required pendulum data. The interface (front-end) is completely written in Python using the Streamlit.io [14] framework for data driven apps.

During the early processing stage, any missing data points are estimated by interpolation and occasional outliers are discarded. This is required in order to always keep the same sampling rate for each day, and to sanitize data. The post-processing includes the computation of gravity from the collected data, corrected for thermal expansion of the wire, complemented by all statistical data such as the mean, standard deviation, and standard error.

Fig. 3. Web application menu showing its options. This interface allows a fast collection and analysis of the data from various places.

As shown in Figure 3, the web app menu allows one to select the pendulum location to collect data from, which date to plot the graphics, the number of individual plots, the start and end points (crop feature) and, finally, select which physical quantity to plot. In Figures 4 and 5, some examples of the graphics produced by the web application are shown.

B. Data Analysis

The following procedure was adopted prior to analyzing the data:

- In the pendulum located at UnB, samples were taken every 23 minutes to achieve approximately 64 data points per lunar day, which is 50 minutes longer than an earth's day. This corresponds to a sample rate of ~60 points per day; At Uniandes each observation was taken every 12 minutes. For each sample 64 pendulum

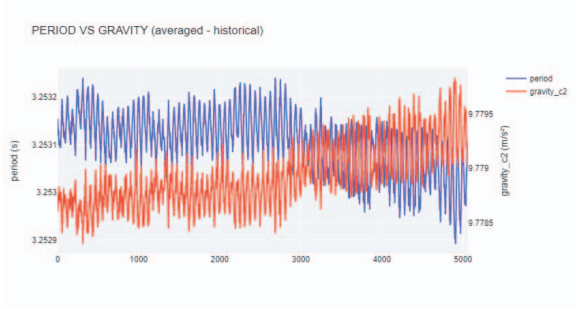


Fig. 4. Pendulum period and computed (thermal corrected) gravity from the pendulum at UnB, Brazil. In places facing a strong thermal amplitude is crucial to correct the pendulum length specially for differential measurements.

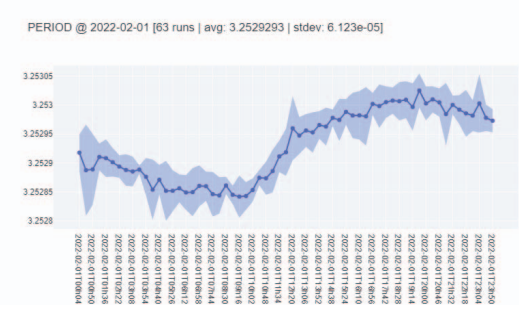


Fig. 5. Pendulum´s daily period in seconds collected from the pendulum at UnB, Brazil. In places with low thermal amplitudes the period varies as less as 50 ppm.

oscillations are used, which take approximately 200s to acquire. Cable length is corrected by the thermal expansion coefficient of the cable ($14x10^{-6}$ K) by using the average value of temperature during each sampling series.

- Local gravity is computed [15], [16] using the average period of 64 oscillations and pendulum cable length corrected by thermal coefficient; there is no need of correcting for the inertia (physical pendulum) as this systematic correction is suppressed when calculating the fluctuations by taking differential readings;
- Finally the fluctuation on local gravity is computed by taking the finite differences for each sample point to the averaged *g*; This fluctuation series constitutes the main data to be processed and avoids the DC value on the FFT;
- A power spectrum is computed for the fluctuation series, as pictured in Figure 6.

The number of pendulum oscillations acquired is chosen to be power of 2 as this provides a fast track to check the precision of the oscillations; for instance, the fact that 64 points are acquired in each series allows for the existence of any undesired precessional or torsional movements to be quickly checked.

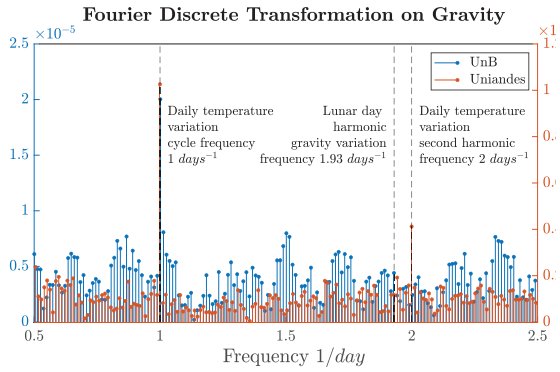


Fig. 6. FFT of gravity for two locations: UnB and Uniandes. A long data set period has to be considered in order to highlight the low frequencies spectrum to spot the difference from daily temperature changes (1/day harmonics) and tidal effect (1.93 occurrences per

IV. FFT Analysis

Detecting tidal local gravity effects is not an easy task since several experimental conditions such as temperature changes heavily affect the instrument measurements. The analysis procedure discussed in the previous section give a clue to find the signal corresponding to tidal effects. Nevertheless, the outcome is noisy and insufficient for determining the source of gravity variation. In order to verify the expected tidal effects, a Fast Fourier Transform (FFT) was introduced (Figure 6).

Since each experiment has its own calibration procedure, the magnitude of discrepancies in the gravity constant estimations have a different scale. Anyhow, for the examples shown in Figure 5, both are in comparable order of magnitude (10-5 m/s2).

On the other hand, temperature is the principal source of false observed gravity variation in a pendulum experiment, because of its effect on the length of the cable. A procedure for detect this influence will be presented in the following section.

A. Spring Tides

It is possible to verify in Figure 6, that the bins with the largest contribution to the signal are around 0.0677 1/day. This result is expected since it corresponds approximately to the period of spring tides of about 15 days (2 occurrences per Lunar month → 2 spring tides per 29.5 days) [10]. This phenomenon is characterized by a greater amplitude of the tide and is caused by constructive interference from the gravitational effects of the Sun and the Moon [17], [18], i.e., by variations of local gravity of greater amplitude that are evidenced as larger variations in the pendulum period. Moreover, several lower frequencies reveal the variance due to the change in distance between the Earth, the Sun and the Moon, which influence the local gravity as well.

The comparison between the FFT of the measured local gravity and the FFT of the temperature variation (Figure 7), allows highlighting the resulting frequency components induced by temperature variations and correspondingly those revealing real variations on gravity.

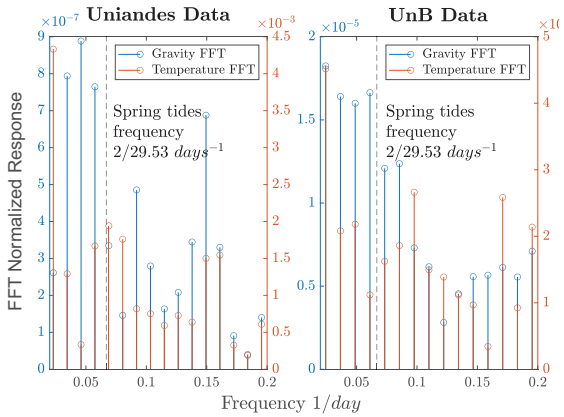


Fig. 7. Gravity and temperature FFT. Data from Uniandes (a) and UnB (b).

For both cases shown in Figure 7, the dashed vertical line marked as "Spring Tides Frequency" indicates the presence of calculated gravity variation not mistakenly induced by temperature changes. In this graphs the first peak (0.032 1/day) in gravity FFT seems to be highly influenced by a temperature variations of similar frequency. This is not the case for the second peak (0.064 1/day) since the temperature influence at this frequency is much lower.

B. *Daily Gravity Variation*

The daily gravity variation (1 occurrence per day) is highly influenced by temperature variation as shown in Figure 8. In addition to the cable length, temperature also affects the electronics behavior and induces noise. Thus, it is better to identify this effect on the second harmonic located in 1.93 per day, as the lunar day is slightly longer than 24 hours. Although, the FFT does not show an evident peak in this frequency.

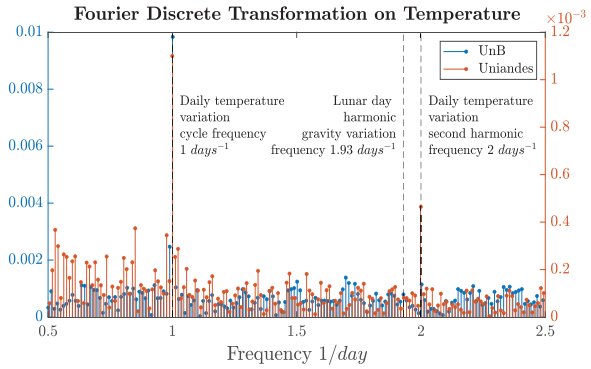


Fig. 8. FFT of temperature variations for two locations: UnB and Uniandes.

To overcome this effect, it is necessary to increase the acquisition of data in time. This would lead to an accumulation of tidal signal energy in the corresponding harmonic frequencies (Figure 9). The variation of frequency peaks as the collection time is increased, is noticeable. Therefore, the accuracy of the validation of the tidal effect on the gravity is also enhanced.

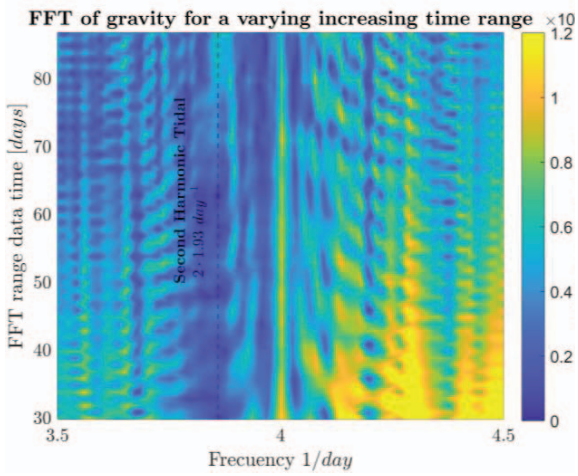


Fig. 9. Evolution of the gravity FFT with data gathering accumulation:

To observe the accumulated data an initial period is established: in this case 30 days. Then a FFT is applied on the set of data measured in the period, and the data is normalized in order to compare the magnitude response with other time ranges. The procedure is repeated to enlarge the set of data (in this case adding data of 1 day) in each iteration. Since the temperature variations make difficult to observe the 1.93/day frequency, we concentrate the analysis in the frequencies interval [3.5, 4.5] in order to search the second harmonic caused by lunar day effect on gravity. Another representation of the same process is shown in Figure 10 for the frequencies interval [3.76, 3.96].

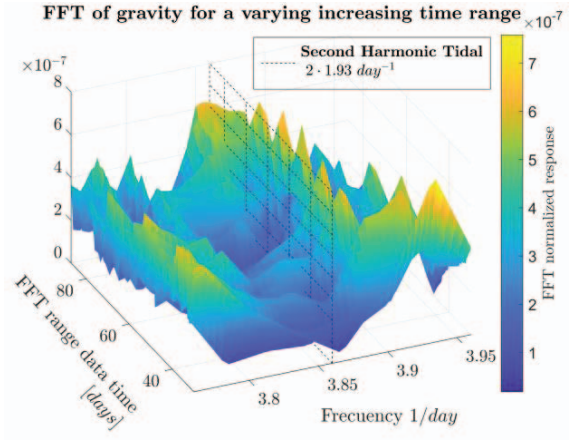


Fig. 10. Evolution of the gravity FFT with data gathering accumulation: data from Uniandes. Frequency spectrum reduced to [3.76, 3.96] in order to show expected periodic behavior.

The expected frequency peak (3.86) becomes clearer as the data accumulates. Initially (data of 30 days) there is no evidence of a peak in such a frequency but after 80 days the peak appears and remains constant since then. This peak corresponds to the second harmonic of the daily tidal effect. The steadiness of the peak in Figure 10 demonstrates that it is not induced by noise. Other peaks also consolidate steadily in this range. Further study on the modeling of tidal effects should explain their appearance [19].

V. CONCLUSIONS

We had presented the use of a set of remote controlled pendulums of the constellation displayed by the World Pendulum Alliance project, for the determination of the orbital period of the Moon. This measurement is based on the study of the variation of local gravity in different locations.

Differential accuracy is sufficient for $1x10^{-6}$ fluctuations detection, the expected order of magnitude of tidal gravity variations as shown previously. The FFT's results demonstrate the existence of the forecasted and expected harmonics for both lunar days and months. Although the sensitivity is marginally above noise, the results are expected to improve with accumulated sampling over several months, and incremental upgrades in the apparatus design.

In the medium term, the experiment will collect annual data series that will substantially increase the low frequency resolution, enhancing the accuracy of the values obtained, and increasing the energy of the envisaged harmonics. Other improvements could consist of: (i) enhance the precision of the machinery of the equatorial plane to avoid jitter; (ii) the use of an Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO), a crystal sealed in a small chamber with a controlled heating element inside to maintain a constant temperature, with typical timing precision of 1 x 10-9 (1ppb). Such improvements, will allow bringing up studies for phase measurements by performing correlation between data acquired simultaneously on several locations.

As a broad outlook of these experiments, one could use it to address several curricular and extracurricular (non-formal education) agendas in countries with limited resources, opening paths for future multilevel educational platforms in science teaching. The potential of the World Pendulum Alliance is vast. Although initially oriented to map global gravity variation with latitude, the WP@ELAB can be used as well to study subtle effects such gravity anomalies shown in this paper.

REFERENCES

[1] WP@elab, https://wpa.tecnico.ulisboa.pt, visited 1/7/2022

[2] World Pendulum - wwwelab, http://www.elab.tecnico.ulisboa.pt/wiki/index.php?title=World_Pendulum, visited 1/7/2022

[3] Scanlon, E., Colwell, C., Cooper, M., & Di Paolo, T. (2004). Remote experiments, re-versioning and re-thinking science learning. Computers & Education, 43(1-2), 153-163.

[4] Gauld, C. (2005). Pendulums in the physics education literature: a bibliography. In The pendulum (pp. 505-526). Springer, Dordrecht.

[5] Jerzy, W., & Krzysztof, K. (2009). Regular and chaotic motions of an autoparametric real pendulum system with the use of a MR damper. In Modeling, simulation and control of nonlinear engineering dynamical systems (pp. 267-276). Springer, Dordrecht.

[6] Tongaonkar, S. S., & Khadse, V. R. (2011). Experiment with Conical Pendulum. European Journal of Physics Education, 2(1), 1-4.

[7] Wong, WK., Chao, TK., Chen, PR. et al. J. Comput. Educ. (2015) 2: 77. https://doi.org/10.1007/s40692-015-0026-1

[8] Precision Pendulum - wwwelab, https://www.elab.tecnico.ulisboa.pt/wiki/index.php?title=Precision_Pendulum, visited 1/07/20222.

[9] Fernandes, H., Fortunato, J., Pedro, L., & Pereira, T. (2017). PICNODE board specs. https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/EU-PhD/2ndedition/dspicnode_internal_report.pdf, visited1/7/2022

[10] Henriques, R. B. et al. (2015). "A generic communication protocol for remote laboratories: An implementation on e-lab", 2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) (pp. 1-6), doi: 10.1109/ANIMMA.2015.7465632.

[11] eLab web manager, http://e-lab.ist.eu, visited 1/7/2022.

[12] Neto, R. B., Fernandes, H., Pereira, J., & Duarte, A.S. "e-lab remote laboratory integrated overview", Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2012 9th Conference.

[13] Matthews, M. R., Gauld, C. F., & Stinner, A. (Eds.). (2005). The pendulum: Scientific, historical, philosophical and educational perspectives. Springer Science & Business Media.

[14] Streamlit, https://streamlit.io/, visited 27/7/2022.

[15] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). Physics for scientists and engineers with modern physics. Cengage learning.

[16] Fowles, G. R., & Cassiday, G. L. (2005). Analytical mechanics. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.

[17] Castells, M. (2011). The rise of the network society (Vol. 12). John Wiley & Sons

[18] Rabbel, W., & Zschau, J. (1985). Static deformations and gravity changes at the Earth's surface due to atmospheric loading. Journal of Geophysics-Zeitschrift fuer Geophysik, 56, 81-89.

[19] Farrell. W.E. (1973) Earth Tides, Ocean Tides and Tidal Loading. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 274(1239):253–259.

Production of Hard Carbon from Saccharum spontaneum, known as "Paja Canalera"

Mabony Sanchez
Laboratorio Pierre Marie Curie
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
mabony.sanchez@utp.ac.pa

Orlando Auciello
Materials Science & Eng Department
University of Texas at Dallas
Dallas Texas, USA
orlando.auciello@utdallas.edu

Benjamin Stein
Materials Science & Eng Department
University of Texas at Dallas
Dallas Texas, USA
ben.stein@utdallas.edu

Elida de Obaldía
Laboratorio Pierre Marie Curie
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
elida.deobaldia@utp.ac.pa

***Abstract*— To produce eco-friendly sodium ion batteries that meet the need for energy storage sources in regions with uneven conditions, the preparation of hard carbon anode materials from organic matter and biological waste is required. The raw material Paja canalera (PC) is introduced through Microwave Pyrolysis (MP) as the first candidate for anode material, evaluated through morphological and structural characterization techniques such as scanning electron microscopy (SEM), x-ray spectroscopy (XRD) and Raman spectroscopy. Different precursors are also evaluated according to their biostructure, compatible for the intercalation of sodium ions. The evaluation of the different precursors focuses on the interest of understanding the sodium storage mechanism and the structure-function correlation, which allows sodiation, key for the design of functional anodes.**

Keywords— hard carbon, hard carbon structure, biostructure

I. INTRODUCTION

Graphite is the most common material used as anodes in lithium-ion. However, Sodium (Na) does not incorporate in graphite, for this reason, in sodium ion batteries the most common material is a carbon called hard carbon [1].

The production of hard carbon by more enviromentally friendly are those derived from biomass, and have caused great interest as an alternative for the substitution of conventional raw materials to produce carbon. [2]

Hard Carbon is a kind of amorphous carbon, which means, it does not have a long range of order but has short or medium range of order. The terminology "hard" carbon is used to describe carbonaceous materials which do not transform into graphite even at higher temperatures. Hard carbons also received this name due to their mechanical hardness compared with soft carbons.

Hard carbon has a turbostratic structure, that is, the basal planes have slid laterally with respect to others, causing the space between them to be greater than graphite with ideal space, it has a nongraphitizable nature, and it was suggested to be rooted from the interlayer cross-linking of the precursors,[3] or the existence of covalent C-O-C bonds.[4]

Dahn et al. developed the first structural model for hard carbon called the "falling cards" or "card house" model, which suggests the presence of small graphene sheets, amorphous regions with defects, and nanopores in the hard carbon structures.[5] The morphology can be spherical, wirelike, or porous, the structure of the precursors or raw material is generally preserved. The small graphene layers, also referred as graphitic domains, exhibit restricted stacking in a range of two to six layers, and have limited lateral dimension of ≈40 Å, also are ordered on the short range [6,7].

It's important to mention that the paralleled layers of the graphitic domains are bent, curved, or turbostratic, rather than flat, as illustrated in the "falling cards" model.[8] The interlaminar spaces (d_{002}) of hard carbon are 3.6–4.0 Å, which are larger compared with 3.35 Å for the graphite.[3] Most of the C atoms in the hard carbon are in the form of six membered carbon rings, there are also some pentagonal or heptagonal defective sites.[9] The graphitic domains, vacancies, edges, and defective sites also exist in the hard carbon structures. The structural features of hard carbon are illustrated in Figure 1.

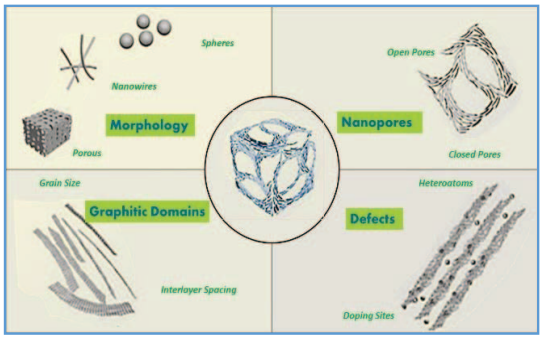


Fig. 1. Hard carbon structure, example. Oginal idea from (Zhao et al.,2020)

The microstructures of the hard carbon obtained from biomass are determined by the structures of the precursors selected, the possibility of structural modifications after the

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00130

pyrolysis process is low. The biomass or precursors are generally porous with large specific surface area, during organics materials pyrolysis various inorganic salts are formed and it is possible to increase the specific surface area.

The choice of precursors is an important factor, it is necessary to consider the structure, yield, porosity, and impurity content of the synthesized hard carbon [14], linear or porous morphologies inherited from the precursors with improved electrolyte accessibility and decreased ion transfer distance can significantly boost the performance of hard carbon anodes.

The choice of biomass materials as a precursor for hard carbon fabrication is due to there are abundant resources, it has low production price, it implies environmental benefits and easy processing. The hard carbon synthesized from organic materials can duplicate the morphologies from the precursors. According to the literature this is rooted from the high melting points of crystalline celluloses, which are higher than their decomposition temperatures [15].

The Saccharum spontaneum, locally known as "Paja Canalera" is an invasive grass that was introduced in Panamá as part of a failure agricultural experiment, currently the S. spontaneum, covers extensive areas of land throughout the country and is considered a pest, this specie represents an environmental problem and makes it a strong candidate to evaluate its potential for energy use [21].

Given the extensive land covered by Paja Canalera, this study evaluates its potential as a raw material to produce hard carbon.

It is important to highlight that previous works have used biomass rich in glucose($C_6H_{12}O_6$)[22] as a precursor to induce the formation of Hard Carbon by pyrolysis, usually thermopyrolysis. Paja Canalera is a relative of sugar cane, therefore, it is expected that its glucose content, added to the microwave Plasma pyrolysis treatment of samples previously treated with natural drying (non-invasive treatments) will allow to obtain samples of hard carbon, without carbonaceous residues such as ashes.

II. Metodology

The samples of Paja Canalera (Fig 2) were collected from San Carlos, west Panamá City. The sample was taken from a live plant and it was separated into the leaf, the steam inner core and the steam outer layer to evaluate if there are differences among these selected sections. As a pretreatment the Paja Canalera was dried naturally leaving the samples in open containers.

Fig. 2. Paja Canalera, San Carlos, Panama.

The used system to transform the organic material into hard carbon is called Microwave Plasma Pyrolysis (Fig 3).

Fig. 3. Microwave Plasma Pyrolysis System, University of Texas at Dallas.

In this system, the microwave (MW) energy is directed to the polar water molecules contained in the organic material covering it, this energy is delivered to a low pressure below $10\ Torr$, the gaseous environment correspond to Ar gas with residual atmospheric N_2 and O_2. The MW power, at low pressure induces the formation of plasma containing ions, neutral atoms, and free electrons, which act on the raw material and induce chemical and physical changes [10], the carbonaceous residue obtained is nothing more than our candidate for hard carbon (Fig 4) obtained by pyrolysis.

Fig. 4. Paja canalera, steam inner core before(up) and after(down) the pyrolyzation.

As it can be appreciated in Fig 4, the physical structure of the organic material is preserved, which requires that the samples be crushed into a power for XRD analysis. This was

achieved using an agate mortar. The samples were then prepared for analysis.

X-ray diffraction (XRD) is a characterization technique whose purpose is to study the structure of materials at the atomic level, in this case it is used to determine the structure of our hard carbon. The diffractions patterns were obtained with a Rigaku Ultima III X-ray diffractometer (Rigaku, Tokyo, Japan) using the CuKα radiation, λ = 1.5406 Å, setting the angular region of 2θ = 10–80◦ with step-scanning of 0.01◦

Raman spectroscopy is used as a characterization technique for carbon allotropes, such as graphite or diamond, and disordered structures. It is a research tool of carbon-based materials to understand their structural changes. The disordered structures were analyzed using Raman spectroscopy by a Thermo DXR Raman spectrometer (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA 02451) with a 532 nm wavelength laser beam. The deconvolution of the peaks was done using the program Fityk.

The Scanning Electron Microscopy (SEM) is a technique for obtaining images of a material at high magnifications that provides information on particle size, morphology, porosity and microstructure. The samples were characterized using scanning electron microscopy (SEM, ZEISS SUPRA-40, Zeiss Corporation, Oberkochen, Germany).

III. RESULTS AND DICUSSION

A. X ray difraction

As found in the literature, the diffraction patterns of hard carbon have two maxima of great width in the diffraction angles around 20-26º and 43-44º, corresponding to the planes (002) and (100).

The diffractogram shown in fig 5 corresponds to the amorphous carbon type. The local structure of hard carbons can be described as highly turbostratic and disordered 2H graphite [11]. It can be observed the presence of impurities, because of the nature of biomass, so the diffractograms present at least one diffraction maxima referred to inorganic compounds such as: MgO and SiO2, Ca and K. Those contributions were seen in first instance in the EDS (Electron dispersion Spectroscopy) information, and consequently we look for the match for those diffraction maxima showed below.

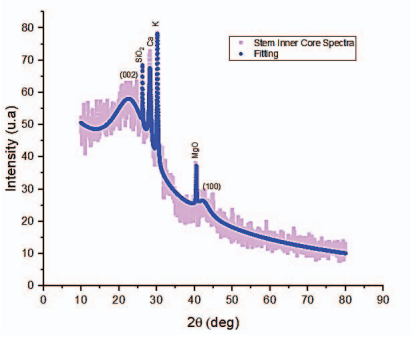


Fig. 5. XRD Spectra for Paja Canelera, Stem Inner Core Sample.

The results of the Paja Canalera samples tested, and its parameters are showed in table 1.

Sample	XRD PARAMETERS			
	$2\theta_{(002)}$	β_c	$2\theta_{(100)}$	β_a
Stem Inner core	23.16	12.39	42.41	4.15
Stem Outer Layer	22.31	12.73	42.85	4.00
Leaf	23.03	10.00	42.78	4.68

Table 1 XRD parameters for different Paja Canalera Samples

Through values of the angular position of the maxima (002) and (100) can be estimated the interlaminar spaces of planes (002) and (100), that it is (d_{002} and d_{100}), the width of the graphene sheets (L_a) and the height of the stacked graphene sheets (L_c), that is the size of the crystallite. To calculate the space between graphene sheets and their sizes in the plane Equations 1 and 2 were used, which are cases Bragg's law.

$$d_{002} = \frac{\lambda}{2sin\theta_{002}} \quad (1); \qquad d_{100} = \frac{\lambda}{2sin\theta_{100}} \quad (2).$$

Where d is the distance between the atomic layers of the crystal, λ the wavelength of the incident beam and θ the angle between the incident ray and the scattering plane corresponding to (002) and (100). On the other hand, to obtain the dimensions of the graphene sheets (La) and the height of the stacked graphene sheets (Lc). Equations 3 and 4 are used, which are result of applying the Scherrer equation to the case of this type of carbon.

$$L_a = \frac{1.84\lambda}{\beta_a cos\theta_{100}} \quad (3); \qquad L_c = \frac{0.9\lambda}{\beta_c cos\theta_{002}} \quad (4).$$

Where θ is the angle of diffraction, λ the wavelength of the incident beam and β the width half height of the diffraction maxima. The values multiplying the wavelength are called shape factor, which are constants that depend on the shape of the particles and have been taken from the literature for this type of carbon. [20]

Finally, to know the number of stacked graphene sheets in each crystallite (N), use Equation 5.

$$N = \frac{L_c}{d_{002}} \quad (5)$$

Table 2 presents the values of d_{002}, d_{100}, L_c, L_a and N obtained for different samples. The graphite spacing between the graphene sheets (d_{002}) is 3.354 Å. [19], on the other hand, hard carbons always tend to present spacing values interlaminar greater than or equal to 3,440 Å. The size of the spacing between the graphene sheets is very important, since, when the greater this is, the more space there will be to inserting the sodium ion into the material.

Sample	XRD Samples Physical Parameters				
	$d_{(002)}$	$d_{(100)}$	L_c	L_a	N
Stem Inner core	3.84	2.13	6.55	41.98	1.71
Stem Outer Layer	3.98	2.11	6.36	43.62	1.60
Leaf	3.86	2.11	8.11	37.27	2.10

Table 2 Physical parameters of the samples through the XRD characterization

Beside the broad peaks at ~22 º and ~43º, there are 4 narrow peaks that can be associated with the presence of SiO2, Ca, K and MgO as can be appreciated in fig 5. These elements also been observed by EDS, the positions and the identity of the narrow peaks were verified trough Software for phase analysis using powder diffraction data.

B. Raman Spectroscopy

Amorphous carbons, disordered or nanocrystalline and even those containing small domains of graphitic arrangement, presents a Raman spectrum with two characteristic bands, the G band (1580-1600 cm-1) and the D band (1300-1360 cm-1), while pyrolytic graphite, for example, with a high degree of three-dimensional ordering, it lacks a D-band. In general, the D band is related to the vibrational mode of microcrystalline graphite which is only active in Raman when there are structural defects in the planes of graphene, while the G band is related to defects in the stacking of these sheets.

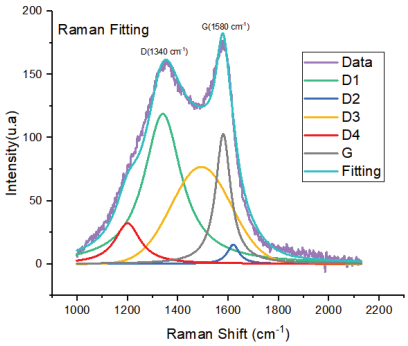


Fig. 6. Raman Spectra Fitting for the stem inner core

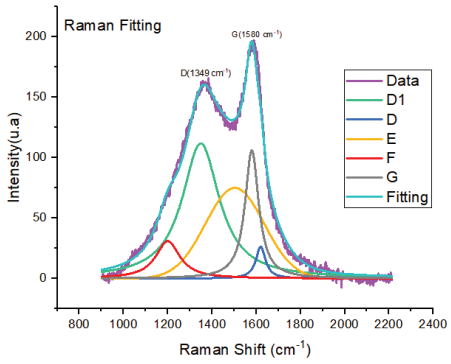


Fig. 7. Raman Spectra Fitting for the outer layer of steam

A deconvolution and fitting procedure of the Raman spectra is showed in Fig 4. the D and G bands can be generally deconvoluted in five components, namely G, D1, D2, D3, and D4 [12] the curve fitting used a Gaussian–Lorentzian combination: 1 Gaussian (D3) and 4 Lorentzian (G, D1, D2 and D4) bands, according to Sadezky et al. [12], the D1 band corresponds to the vibration mode of disordered graphitic lattice, the D2 band is characterized by the vibration mode of disordered graphitic lattice. The D3 band is attributed to the sp2 bond form of amorphous carbon including organic molecules and fragments of functional groups. The D4 band is related to C-H termination groups or, more in general, to adsorbed molecules or molecular fragments. Dippel et al. [17] observed this band at 1190 cm^{-1} in Raman spectra of flame soot and tentatively attributed it to sp2-sp3 bonds or C–C and C=C stretching vibrations of polyene-like structures. De Obaldía et al.[18] attributes the H incorporation primarily to the passivation of dangling C bonds at the grain boundaries. The G band is attributed to the vibration mode of ideal graphitic lattice.

Band	Steam Inner Core Sample	
	Center	*fwhm*
D1 (1350 cm^{-1})	1340	180
D2 (1620 cm^{-1})	1620	58
D3 (1500 cm^{-1})	1493	280
D4 (1200 cm^{-1})	1200	121
G (1580 cm^{-1})	1580	72
	Steam Outer Layer Sample	
D1 (1350 cm^{-1})	1349	204
D2 (1620 cm^{-1})	1620	52
D3 (1500 cm^{-1})	1503	312
D4 (1200 cm^{-1})	1200	132
G (1580 cm^{-1})	1580	74

Table 3 Deconvoluted parameters of the Raman spectra

The ratio of the areas between the D and G bands can be associated with the distance between the defects in the carbon crystals of the samples, taking into account that the increase in this relationship corresponds to the decrease in the distance between these defects and, therefore, with an increase in the disorder between the graphene sheets. [19] Once the areas of the D and G bands are known, the ratio of these can be calculated by means of the Equation 6.

$$A_D/A_G = \frac{Área\ D}{Área\ G} \quad (6)$$

For Hard Carbon this ratio should be around 2.89

Band	Areas Values	
	Inner Core	*Outer Layer*
D1	33571	35864
D2	1386	2156
D3	22907	24920
D4	6155	6423
G	11618	12446
D1/G	2.89	2.88
D2/G	0.12	0.17
D3/G	1.97	2.00
D4/G	0.53	0.52

Table 4 Peaks area ratio

To minimize the number of free parameters, we keep the center of the peaks fixed to the empirical values described in the literature. The fact that the D1 and G1 peaks areas ratio can be adjusted to fit the data, suggest that hard carbon is probably present in these samples.

C. Scanning electron microscopy

The SEM pictures, for different parts of the Paja Canalera: leaf, inner core of the stem, and outer layer of the stem are showed below.

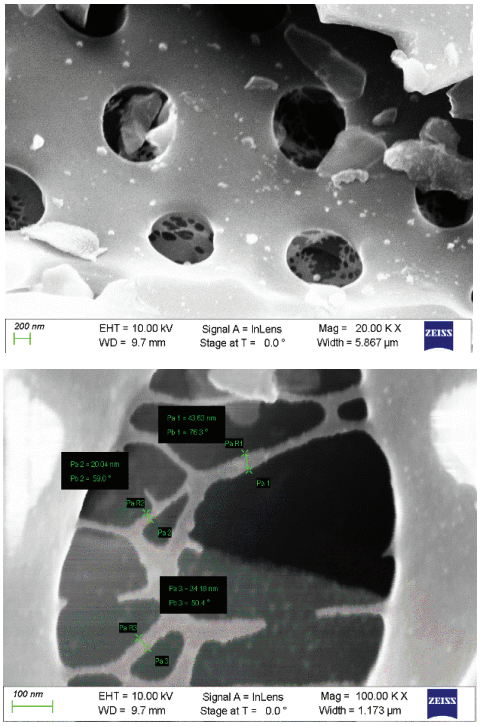


Fig. 8. SEM, PC leaf

One of the interesting aspects of the hard carbon produced by pyrolysis is that it retains the biostructure of the raw material.

In the case of the leaf sample its morphology can be seen in the form of many hollow cell, with a similar structure (Fig 8). If we compare with the original biostructure inside the leaf it looks like the leaf stomatal pore. Stomatal pore length and width are different for each kind of leaf. The hollow cell observed has a width ~ 800 nm. At the nanometric scale, inside the cell, there are filamentary structures with a width oscillating between 20 and 44 nm can be seen. We can also suggest the presence of Carbon nanotubes (Fig 9)

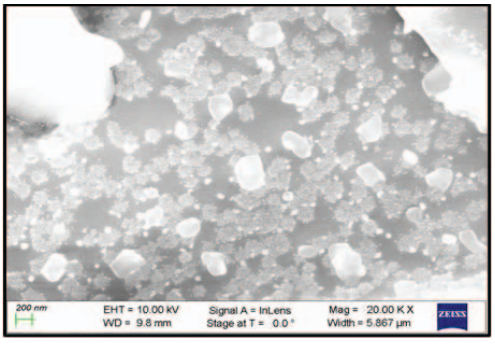


Fig. 9. SEM,PC inner core of stem

The inner layer of the stem is observed in the form of aggregates, some of them looks like crystals with size in the order between 200 nm – 400 nm, with irregular symmetries (Fig 9).

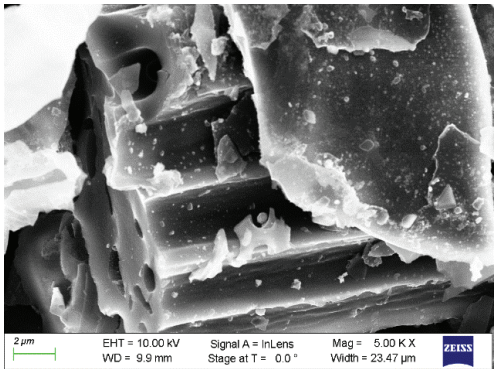


Fig. 10. SEM, PC outer layer of stem

The outer layer of the stem is observed in the form of opened canals with regular symmetry (Fig 10). If it is compared with the original biostructure of the stems type cains, it looks like meristem that determines the elongation of the stem.

IV. Conclusions

In this work it has been shown that it is possible to prepare amorphous, disordered carbons of the hard carbon type from organic matter, in this case Paja Canalera, by microwave plasma pyrolysis, using natural drying as pretreatment. The fact that biomass is used as an alternative to fossil materials for the preparation of anodes for sodium ion batteries is highlighted, taking the use of commercial hard carbon out of context and in addition, the microwave plasma pyrolysis synthesis procedure is performed in an inert medium.

The analysis of the samples synthesized evaluated through morphological and structural characterization techniques such as XRD, Raman and SEM, allows us to consider the various samples of Paja Canalera as a potential candidate for hard carbon that can be used as an active material, anode electrode for sodium ion batteries.

The diffractograms in this work have two maxima at approximately 23° in the (002) plane and at 43° in the (100) plane, these angles are within the range reported in the literature for hard carbon. The interlaminar spacing between the graphene layers obtained presents values between 3.84 Å and 3.98 Å, therefore, we have interlaminar spacing greater than or equal to 3,440 Å, corresponding to hard carbon observations.

It can be suggested that the Paja Canalera leaf sample presents a superior stacking between the graphene layers (N), specifically it has a double layer, compared to the samples of the inner and outer core of the stem, which present one and a half layers, it is worth noting which also has a higher layer height (La). The sample of the outer layer of the stem has a larger lamina size (Lc).

In the spectrum analyzed in Raman, two spectra were evaluated to verify the D1/AG area ratio so that it can be verified first if the hard carbon candidates produced are homogeneous or not. The D1/G values for the pyrolyzed samples (Stem Inner Core, Outer Layer Core) indicate that they are homogeneous, since their D1/G are like each other. For both samples, the value of the D1/G ratio remains within the value observed for hard carbon (2.89).

The next step is to measure the electrochemical properties of the hard carbon in the presence of a Na+/Na to assess the energy capacity of the hard carbon produced by pyrolysis of the Paja Canalera.

REFERENCES

[1] Nieto Alvarado, N. (2019). Preparación de ánodos para baterías de ión-sodio basados en biomasa (Tesis de licenciatura). Universidad del País Vasco, España.

[2] Xiao B., Rojo T., y Li X., 2019. Hard Carbon as Sodium-Ion Battery Anodes: Progress and Challenges.

[3] R. A. Adams, A. Varma, V. G. Pol. Carbon Anodes for Nonaqueous Alkali Metal-Ion Batteries and Their Thermal Safety Aspects

[4] H. Marsh, in Introduction to Carbon Science, Butterworth Publishers, London 1989.

[5] J. R. Dahn, W. Xing, Y. Gao, the falling cards model" for the structure of microporous carbons.

[6]) E. R. Buiel, A. E. George, J. R. Dahn, Model of micropore closure in hard carbon prepared from sucrose.

[7] S. Qiu, L. Xiao, M. L. Sushko, K. S. Han, Y. Shao, M. Yan, X. Liang, L. Mai, J. Feng, Y. Cao, X. Ai, H. Yang, J. Liu, Manipulating adsorption‐insertion mechanisms in nanostructured carbon materials for high‐efficiency sodium ion storage

[8] Z. Li, Z. Jian, X. Wang, I. A. Rodriguez-Perez, C. Bommier, X. Ji; Hard carbon for sodium storage: mechanism and optimization strategies toward commercialization.

[9] P. J. F. Harris, J. Fullerene-like models for microporous carbon

[10] Stein B, Auciello O, Arellano-Jimenez M, Perez B. Fungal Mycelium Conversion into Ultrananocrystalline Diamond viaMicrowave Plasma Pyrolysis

[11] R.E. Franklin, The interpretation of diffuse X-ray diagrams of carbon.

[12] L. Bokobza, J.-L. Bruneel, M. Couzi, Raman spectra of carbon-based materials (from graphite to carbon black) and of some silicone composites.

[13] Sadezky, A., Muckenhuber, H., Grothe, H., Niessner, R., Pöschl, U.: Raman microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: spectral analysis and structural information.

[14] C. d. M. Saavedra Rios, V. Simone, L. Simonin, S. Martinet, C. Dupont, Biochars from various biomass types as precursors for hard carbon anodes in sodium-ion batteries

[15] K. Wang, Y. Xu, Y. Li, V. Dravid, J. Wu, Y. Huang, J. Mater, Sodium storage in hard carbon with curved graphene platelets as the basic structural units

[16] Y. Lu, L. Yu, X. W. Lou, Nanostructured conversion-type anode materials for advanced lithium-ion batteries

[17] Dippel B, Jander H, Heintzenberg J. NIR FT Raman spectroscopic study of flame soot. Phys Chem Chem Phys1999;1:4707–12.

[18] de Obaldía, E.I.; Alcantar-Peña, J.J.; Wittel, F.P.; Veyan, J.F.; Gallardo-Hernadez, S.; Koudriavtsev, Y.; Berman-Mendoza, D.; Auciello, O. Study of Atomic Hydrogen Concentration in Grain Boundaries of Polycrystalline Diamond Thin Films. Appl. Sci. 2021, 11, 3990

[19] Sánchez Fontecoba, P., 2017. Advanced anode materials for sodium ion batteries. Departamento de Química Inorgánica, Universidad del País Vasco.

[20] Saenko N. S., 2012. The X-ray diffraction study of three-dimensional disordered network of nanographites.

[21] Aguilar, O., Navarro, D., & Lay, J. (2018). Evaluación y análisis de la paja canalera como material biomásico para la generación de energía eléctrica mediante gasificación.

[22] D. A. Stevens and J. R. Dahn 2000 J. Electrochem. Soc. 147 1271

Synthesis and characterization of polycrystalline $BiFeO_3$ deposited by Sol-gel technique

Síntesis y caracterización de $BiFeO_3$ policristalíno depositado por la técnica de Sol-gel

Héctor Miranda
Laboratorio Pierre y marie Curie
Facultad de Ciencias y Tecnologia,
Universidad Tecnológica de Panama
Panamá, Panamá
hector.miranda@utp.ac.pa

Elida de Obaldía
Laboratorio Pierre y marie Curie
Facultad de Ciencias y Tecnologia,
Universidad Tecnológica de Panama
Panamá, Panamá
elida.deobaldia@utp.ac.pa

Eleicer Ching-Prado*
Laboratorio Pierre y marie Curie
Facultad de Ciencias y Tecnologia,
Universidad Tecnológica de Panama
Panamá, Panamá
eleicer.ching@utp.ac.pa

***Abstract* — A thin film of $BiFeO_3$ (BFO) was fabricated on an FTO/glass substrate using the sol-gel method and applying a sequential layered deposition process. The raw materials used in the starting solution were bismuth nitrate pentahydrate ($Bi(NO_3)_3{\cdot}5H_2O$), iron(III) nitrate nonahydrate ($Fe(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$), and ethylene glycol ($HOCH_2CH_2OH$) as solvent. A 5 mol% excess of bismuth was used to compensate for its volatility during high-temperature annealing. Structural analysis by High-Resolution X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy indicated that the film exhibits a rhombohedral distorted perovskite structure without impure phases. Raman spectroscopic analysis showed 13 Raman phonon active modes (4A1 + 9E) corresponding to the rhombohedral structure R3c. The morphological study using Scanning Electron Microscopy (SEM) revealed a surface formed by agglomerations of grains with a certain degree of porosity. The thickness of the BFO film obtained from the cross-sectional image indicated an approximate thickness of 555 nm. Analysis of XPS spectra revealed the coexistence of Fe^{2+}/Fe^{3+} ions in the film. The optical study showed that the film has a maximum transmittance of 66% in the visible region. The estimated value of E_g was 2.33 eV, which is consistent with those reported for BFO thin films by other researchers. In our study, it was found that the leakage current is a consequence of oxygen vacancies induced mainly by the volatilization of Bi and the presence of Fe^{2+} ions.**

***Keywords*— BFO, multiferroic, perovskite, R3c, thin film.**

***Resumen* — Se fabricó una película delgada de $BiFeO_3$ (BFO) sobre un sustrato FTO/vidrio mediante el método sol-gel y aplicando un proceso de deposición secuencial por capas. Las materias primas utilizadas en la solución de partida fueron nitrato de bismuto pentahidratado ($Bi(NO_3)_3{\cdot}5H_2O$), nitrato de hierro(III) nonahidratado ($Fe(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$) y etilenglicol ($HOCH_2CH_2OH$) como disolvente. Se usó un exceso de 5% en moles de bismuto para compensar su volatilidad durante el recocido a alta temperatura. El análisis estructural por Difracción de Rayos X de alta resolución y Espectroscopia Raman indicaron que la película exhibe una estructura de perovskita distorsionada romboédrica sin fases impuras. El análisis espectroscópico Raman mostró 13 modos activos de fonones Raman ($4A_1$ + 9E) correspondientes a la estructura romboédrica R3c. El estudio morfológico mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) reveló una superficie formada por aglomeraciones de granos con cierto grado de porosidad. El espesor de la película de BFO obtenida de la imagen de sección transversal indicó un espesor aproximado de 555 nm. El análisis de espectros XPS revelaron la coexistencia de iones Fe^{2+}/Fe^{3+} en la película. El estudio óptico mostro que la película tiene un máximo de transmitancia del 66% en la región del visible. El valor estimado de E_g fue de 2.33 eV el cual es cónsono con los reportados para películas delgadas de BFO por otros investigadores. En nuestro estudio, se encontró que la corriente de fuga es consecuencia de vacantes de oxígeno inducidas principalmente por la volatilización de Bi y la presencia de iones de Fe^{2+}.**

***Palabras claves* —BFO, multiferroico, Perovskita, R3c, película delgada.**

I. INTRODUCCION

En los últimos años, los materiales multiferroicos (MMF) han captado la atención de muchos investigadores y de la industria de dispositivos electrónicos porque tienen la capacidad de exhibir la coexistencia de propiedades ferromagnéticas y ferroeléctricas simultáneamente [1]. Dentro de la familia de MMF, los óxidos ferroeléctricos (OF) con estructura tipo perovskita ABO_3 (donde A y B son cationes y O un anión como oxígeno, nitrógeno o haluros), son ampliamente estudiados debido a sus innumerables aplicaciones en el desarrollo de nuevas tecnologías [2].

Algunas de las características nativas de la estructura ABO_3 surgen de la diferencia en las electronegatividades del átomo de oxígeno y el metal de transición en el sitio B, lo que generalmente contribuye a que este tipo de materiales presenten una brecha de banda ancha (E_g > 3 eV) [2]. Además, en la mayoría de los casos, el ion del sitio B también realiza el importante trabajo de permitir la presencia de ferroelectricidad [2]. Estas características, han permitido que los OF se utilicen en la fabricación de sensores, dispositivos de almacenamiento de datos, sistemas magnetoeléctricos, capacitores y celdas solares fotovoltaicas, por mencionar algunos [3]. Entre los distintos MMF investigados hasta la fecha, podemos mencionar los compuestos a base de $BiMnO_3$, $TbMnO_3$, $YMnO_3$, $BaTiO_3$ (BTO), $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT), etc. [4]. Sin embargo, aunque estos materiales tienen propiedades interesantes, su uso en aplicaciones fotovoltaicas ha mostrado una eficiencia de conversión de energía muy baja, dando como resultado fotocorrientes muy pequeñas (~nA/cm^2), principalmente debido a la banda prohibida relativamente grande. Por esta razón, es fundamental poder sintetizar MMF con banda prohibida estrecha y gran polarización remanente, los cuales son características fundamentales en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos con alta eficiencia de conversión

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00131

energética. Frente a este problema, el óxido de hierro de bismuto $BiFeO_3$ (BFO) es uno de los MMF monofásicos típicos más prometedores. Este material, exhibe una temperatura de Curie ferroeléctrica alta (T_c ~ 1100 K) y una temperatura Néel tipo G antiferromagnética (T_N ~ 643 K) y muestra ambas propiedades a temperatura ambiente [5]. Dependiendo el método de preparación utilizado, el BFO puede cristalizar con una estructura romboédrica (grupo espacial, R3c) donde los iones Bi^{3+} ocupan el sitio A y los iones Fe^{3+} ocupan el sitio B en una red de perovskita distorsionada no centro simétrico. Además, tiene una gran polarización remanente (P_r ~ 90 μC/cm^2) y una banda prohibida relativamente pequeña (E_g ~ 2,7 eV), lo que ha demostrado que es un OF con potenciales aplicaciones fotovoltaicas [6]. Sin embargo, el BFO necesita ser mejorado y resolver algunas dificultades asociadas con su naturaleza. Una de las problemáticas consiste en que el BFO tiene un punto de fusión bajo y es muy volátil, lo que implica que la fase pura de $BiFeO_3$ es difícil de sintetizar debido a que generalmente se obtienen fases con deficiencias de bismuto. Así, se ha reportado que durante la síntesis del BFO la alta volatilidad de Bi_2O_3 conduce a la formación de la fase deficiente en bismuto $Bi_2Fe_4O_9$ y un pequeño exceso de Bi_2O_3 puede conducir a la formación de $Bi_{25}FeO_{39}$ [7]. Además, las fluctuaciones de valencia en el hierro entre Fe^{2+} y Fe^{3+} generan una gran corriente de fuga, lo que dificulta su uso en dispositivos basados en BFO. Por lo tanto, es una propuesta atractiva descubrir cómo reducir la densidad de corriente de fuga y mejorar las propiedades multiferroicas del BFO, simultáneamente. Por lo tanto, la elección del método de preparación juega un papel importante que define las propiedades finales del BFO. Son muchas las técnicas de deposición utilizadas en la fabricación de OF en forma de película delgada, entre las más tradicionales, la técnica sol-gel es una de las preferidas por su fácil aplicación y bajo costo. En este trabajo, se preparó una película delgada ferroeléctrica de BFO con la finalidad de caracterizar sus propiedades morfológicas, estructurales, ópticas y estados de oxidación de modo que permita conocer como la técnica de preparación afecta la calidad de la película.

II. DETALLES EXPERIMENTALES

Se fabricó una película delgada de $BiFeO_3$ sobre un sustrato FTO/vidrio mediante el método sol-gel con un proceso de deposición de capas secuencial.

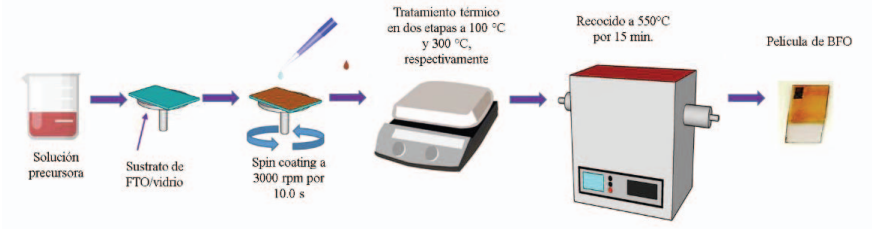


Fig. 1. Diagrama del proceso de preparación de la película de $BiFeO_3$ (BFO)

Las materias primas utilizadas en la solución de partida fueron nitrato de bismuto pentahidratado [$Bi[NO_3]_3 \cdot 5H_2O$] (⩾98,0%, Sigma-Aldrich, Co., EE. UU.), nitrato de hierro (III) nonahidratado [$Fe[NO_3]_3 \cdot 9H_2O$] (⩾99,95 %, Merck KGaA, Alemania). Como solvente se utilizó etilenglicol [$HOCH_2CH_2OH$] (⩾98,0 %, Merck KGaA, Alemania). Se empleó 5 mol% de exceso de bismuto para compensar la pérdida por volatilidad durante el recocido a alta temperatura. Para la solución precursora, se colocaron 3.635 g de nitrato de hierro y 4.365 g de nitrato de bismuto por separado en vasos químicos y a los cuales se les añadió 10 mL de etilenglicol para disolver los precursores simultáneamente en sus respectivos recipientes durante una hora mediante un agitador magnético. Posteriormente, ambas soluciones se vertieron en un balón y se agregaron 10 ml adicionales de etilenglicol para tener un volumen final de 30 mL. Luego, esta mezcla se homogenizó por una hora adicional a una temperatura de 60.0 °C con la ayuda de un roto evaporador Zhongyi Kori modelo RE-201D. Así, la solución obtenida tiene una concentración de cationes de 0,3 mol/L y se deja enfriar a temperatura ambiente. La solución obtenida, se depositó sobre el sustrato FTO/vidrio, usando un equipo de deposición por rotación modelo (12A-Super spin coater) ajustado para girar a 3000 rpm durante 10 s. Posteriormente, el solvente se eliminó a través de un proceso de tratamiento térmico de dos etapas. Primeramente, la muestra se calentó sucesivamente durante 10 minutos por placa y seteadas a 100 °C y 300 °C, respectivamente. Estos procesos se repitieron 15 veces para obtener el espesor de película deseado. El segundo paso del tratamiento térmico consistió en la introducción de las películas en un horno tubular ajustado a una temperatura de 550 °C, con una tasa de 110 °C/min. Una vez alcanzados los 550°C, el horno se mantuvo a esta temperatura durante 10 min. Durante el recocido se mantuvo un flujo de aire de 0,01 L/min. Finalmente, la película delgada de BFO, se enfrió naturalmente dentro del horno tubular hasta alcanzar la temperatura ambiente. El diagrama del procedimiento experimental se muestra en la Fig. 1. La morfología superficial de la película, así como la sección transversal se caracterizaron mediante un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo modelo ZEISS EVO SUPRA 40 con un aumento de 50 KX, un potencial de aceleración de 10 kV y detectores de electrones InLens. La nanoestructura de la muestra se midió a través de la técnica de Difracción de Rayos X (XRD) y luego se analizó mediante el método de refinamiento de Rietveld con el programa gratuito FullProf.

El equipo utilizado fue un difractómetro RIGAKU SMARTLAB X-RAY, que utiliza radiación CuKα (1.540598 Å). Las mediciones de espectroscopia Raman se realizaron con un microscopio Thermo Scientific DXR3 Raman equipado con una excitación láser de iones de Argón (532

nm). Para la caracterización óptica se utilizó un espectrofotómetro UV-Visible Shimadzu modelo UV-1800. Los espectros de transmitancia de 200-1100 nm se ajustaron a través del modelo de dispersión clásico de Lorentz utilizando el código del programa ReFit [8]. El estado de valencia de todas las películas delgadas se estimó a través del espectrómetro de fotoelectrones de rayos X (XPS) Perkin-Elmer PHI 5500 ESCA, con una fuente de radiación Al Kα monocromática (1253.6 eV). La medida de corriente de fuga se realizó con un SMU sourcemeter modelo 2001 de la marca Keithley suministrando voltaje en un rango de -10V A 10V con intervalo de 0.01V dc.

III. ANALISIS Y RESULTADOS

A. Propiedades morfológicas

La Fig. 2 muestra las micrografías de superficie y la sección transversal de la película delgada de BFO. En el caso de la superficie, la Fig. 2a, revela un recubrimiento no homogéneo con algunos poros anchos y grandes formaciones del tipo aglomerado, lo que sugiere un alto grado de porosidad. Una ampliación de esta imagen confirmó que las formaciones observadas son aglomeraciones de granos debido a la superposición de granos de tamaño nanométrico. Son grupos con granos en direcciones de crecimiento aleatorias, lo que revela una muestra con naturaleza policristalina. La formación de superficies porosas en películas delgadas de BFO ha sido documentada previamente por otros investigadores que depositaron películas delgadas de BFO usando la técnica sol-gel [9].

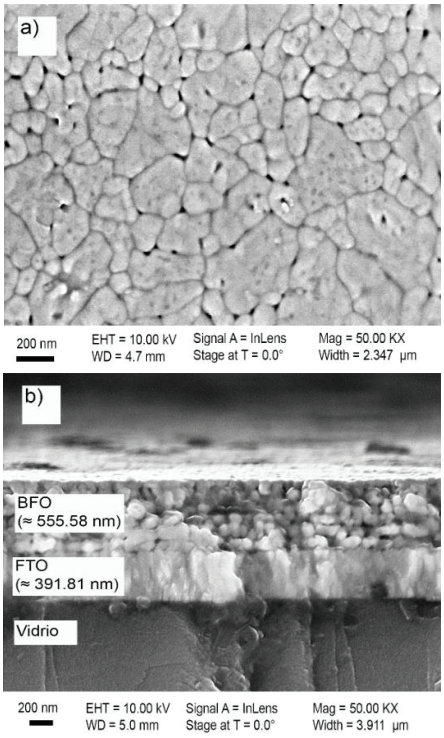


Fig. 2. a) Imagen de la superficie y b) Imagen de la sección transversal de la película delgada de BFO depositada sobre un sustrato de FTO/vidrio

La Fig. 2b, muestra el corte de sección transversal de la película de BFO. Se pudo observar un espesor uniforme desde la primera capa depositada, lo que sugiere que la adecuada extracción de solventes en la primera etapa del tratamiento térmico durante el proceso de deposición juega un papel fundamental en la obtención de un recubrimiento uniforme. Adicionalmente, el espesor de la película obtenido por medición directa de las imágenes de sección transversal, indica que el recubrimiento es de aproximadamente 555 nm. El histograma de tamaño de grano, obtenido mediante un proceso estándar de análisis de imagen se muestra en la Fig. 3. Se encontró una distribución de tamaño de grano de 16 a 438 nm ($S_d \pm 71.817$) con un valor promedio de 117 ± 3,87 nm. Este resultado es consistente con los encontrados por otros investigadores en películas delgadas de BFO con un alto grado de cristalinidad y en donde las altas temperaturas de cocción ≥ 550 °C favorecen la formación de granos de gran tamaño [10]. Además, el particular rango en el tamaño de grano de la muestra es consistente con los resultados calculados según el estudio XRD discutido más adelante.

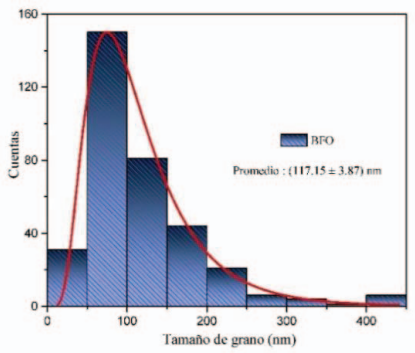


Fig. 3. Histograma de distribución de tamaño de grano sobre la superficie de la película delgada de BFO.

B. Propiedades estructurales.

La Fig. 4, presenta el patrón XRD de la película delgada de BFO medido en el rango $20° \leq 2\theta \leq 80°$ y un intervalo de avance de 0.01°. El espectro de BFO fue indexado de acuerdo con los índices de Miller correspondientes y coincidieron con la estructura romboédrica perteneciente al grupo espacial R3c. Se observó la presencia de al menos ocho picos de difracción bien definidos y ubicados aproximadamente a 22.40°, 32.13°, 37.71°, 39.55°, 45.84°, 51.29°, 57.28° y 67.20° que corresponden a los planos de difracción (012), (110), (113), (202), (024), (116), (300) y (220), respectivamente. La presencia de estas bandas, indican que la película de BFO es policristalina con estructura de tipo perovskita de acuerdo con la tarjeta no. 2102910.cif. referida por la Crystallography Open Database (COD). Se pudo observar la presencia de picos de difracción con poca intensidad, que son característicos del BFO puro. Estos picos corresponden a las posiciones 31.82°, 39.04°, 51.84, 56.49° y 66.32° y planos cristalográficos de (104), (006), (122), (018) y (208), respectivamente. Así, no se observan picos de impurezas en las muestras de BFO. El inserto a) de la Fig. 4 muestra una ampliación del espectro XRD en la vecindad de 32,0° lo que reveló la presencia de tenues dobletes en la película de BFO. De este modo, se pudo apreciar una semi superposición de los picos (104) y (110) lo que confirma la

obtención de BFO puro. Para conocer los parámetros microestructurales y la fase del BFO, se aplicó el método de Rietvelt utilizando el código del programa FullProf.

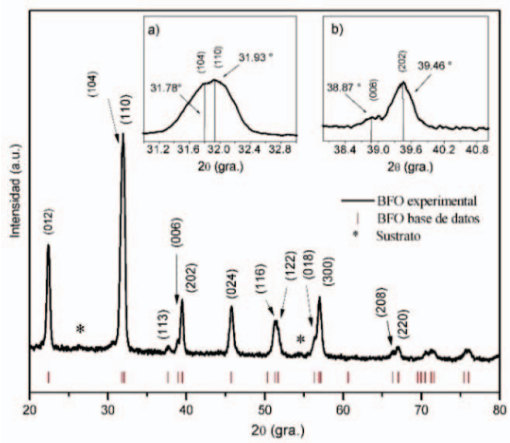


Fig. 4. Espectro de difracción XRD de la película delgada de BFO sintetizada a 550 °C por la técnica de sol-gel. Los insertos a) y b) son aumentos del espectro XRD en las vecindades de energías de 32.0° y 39.5°, respectivamente.

Este método consiste en ajustar un modelo teórico a un patrón experimental de difracción de rayos X utilizando un enfoque de mínimos cuadrados hasta obtener el mejor ajuste. Para modelar la forma del pico de difracción se utilizó una función pseudo-Voigt de Thompson-Cox-Hastings (TCHZ-pV). El modelo matemático (TCHZ-pV) en el refinamiento de Rietveld viene dado por:

$$TCHZ - pV = nL + (1 - \eta)G \qquad (1)$$

Donde, L y G representan las funciones Lorentziana y Gaussiana empleadas en el modelado de los picos de difracción, y η es el parámetro de mezcla de estas funciones. En el método TCHZ, el ensanchamiento total del pico de difracción (H) se modela mediante una expresión polinomial ampliamente conocida [11]. La Fig. 5 muestra los patrones de difracción experimentales XRD (puntos de esferas negras) junto con los datos calculados de refinamiento de Rietveld (línea roja continua) para muestra de BFO. Es posible observar que el perfil experimental (Y_{obs}) y el calculado en el refinamiento de Rietveld (Y_{calc}) coinciden entre sí. Además, muestran que todos los picos experimentales están claramente asociados con las posiciones Bragg 2θ permitidas (líneas verticales) para el grupo espacial R3c.

En el refinamiento de Rietveld, los datos de ajuste experimental son determinado mediante el cálculo de varios factores de confiabilidad (factores R). Así, el factor de perfil (R_p), el factor de perfil ponderado (R_{wp}) y el factor de perfil ponderado esperado (R_{exp}), entre otros, son determinantes en el refinamiento. El parámetro conocido como "indicador de bondad " (S) define la calidad del refinamiento. El refinamiento, reveló que se obtuvo BFO puro sin fases parásitas coexistiendo como derivados del roceso de crecimiento de la muestra. Los parámetros de red y los factores de confiabilidad-R obtenidos al aplicar el refinamiento de Rietveld al espectro XRD de la película de BFO se presentan en la Tabla 1. Los resultados revelan un refinamiento significativo de la microestructura de la película ya que los valores de (S) son pequeños, en comparación con los reportados en la literatura [12]. Se encontró, que los resultados son muy cercanos a los observados por M. Nadeem. et al [13], quienes reportaron parámetros de estructura cristalina refinados incluyendo las constantes de red "a" y "c" y el volumen de celda "V" de 5.5757 Å, 13.8595 Å y V: 373.1540 $Å^3$, respectivamente. Estos valores corresponden a películas delgadas de BFO depositadas con un excedente en la concentración de Bismuto del 5% tal y como se ha realizado en este trabajo. Lo que nos sugiere que nuestro enfoque para sintetizar películas delgadas de BFO está bien orientado.

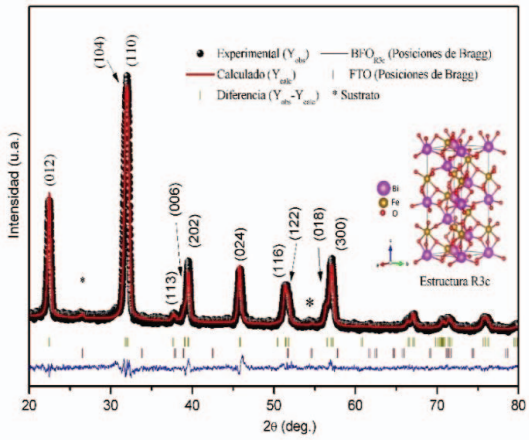


Fig. 5. Refinamiento Rietveld de la película de BFO; el inserto muestra la representación simétrica de la fase R3c del BFO puro

El tamaño medio de los cristalitos $<D_{cristalito}>$ y la macrodeformación residual $<\varepsilon_{residual}>$ se pueden estimar utilizando los valores del ancho máximo a la altura media (FWHM) de los picos de difracción y los resultados también se muestran en la Tabla 1.

Muestra	Estructura cristalina /Grupo espacial	Parámetros de la celda	Parámetros microestructurales		Factores de confiabilidad - R (%)			
			$D_{cristalito}$ (nm)	$\varepsilon_{residual}$ (%)	R_p	R_{exp}	R_{wp}	S
BFO	Romboédrica/ R3c	a = (5.58017 ± 0.00014) Å c =(13.86452 ± 0.00047) Å α = β = 90°, γ = 120° V = 373.878 ± 0.018 $Å^3$	31.32 ± 0.15	8.8750 ± 0.0062	17.7	11.91	14.8	1.24

Tabla. 1. Parámetros microestructurales de la película de BFO obtenidos del refinamiento de Rietveld.

El tamaño promedio de los cristalitos para la película BFO fue de aproximadamente 31,32 nm. Este resultado se ubica en el intervalo de distribución de granos presentada previamente en el análisis SEM y es consistente con los reportados en la literatura para películas delgadas de BFO que han sido tratadas térmicamente a temperaturas cercanas a los 500°C. En el caso de $<\varepsilon_{residual}>$ parece ser una consecuencia de la diferencia de variaciones térmicas experimentadas por el sustrato y la muestra durante el proceso de extracción con solvente y el recocido final a alta temperatura. Materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica presentarán diferente velocidad de respuesta en parámetros micro mecánicos con variaciones de temperatura. Por lo tanto, esta diferencia puede causar tensión de compresión o estiramiento entre la interfase vidrio/FTO y FTO/BFO, generando tensión residual en la estructura cristalina de la película.

C. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es un método efectivo para encontrar los desplazamientos atómicos y los modos de vibración de fonones fundamentales en los estudios de película delgada, lo que puede proporcionar información valiosa sobre las propiedades de la red y las transiciones de fase estructural. El espectro Raman de la película de BFO medido a temperatura ambiente en el rango de número de onda de 50-700 cm^{-1} se muestran en la Fig. 6. A cada espectro se le aplicó un ajuste Voight para asignar el modo activo Raman usando a través del software Peak Fit. La conocida teoría de grupos demuestra que el BFO distorsionado romboédricamente con el grupo espacial R3c exhibe 13 (Γ = 4A1+ 9E) modos activos Raman [14]. En el caso de nuestra película, se pudo observar la presencia de al menos 13 modos de vibración Raman. Es conocido que la identificación exacta de las posiciones de los modos Raman en muestras policristalinas no es algo que se pueda realizar con facilidad debido factores como polarización cruzada, la cual no desaparece en su totalidad aún en muestras monocristalinas. Debido a esto, los modos Raman presentes en la muestra de BFO han sido identificados con la letra M y corresponden a M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12} y M_{13}. Las posiciones de todos los modos Raman se contrastaron con los informados por otros investigadores y estas observaciones se presentan en la Tabla 2.

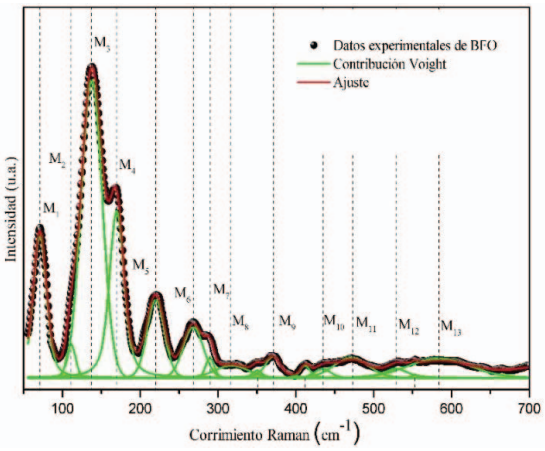


Fig. 6. Espectro Raman a temperatura ambiente de la película depositada de BFO.

Los resultados mostraron que las posiciones de los modos Raman son muy cercanos a los valores reportados para la película delgada de BFO policristalino. Además, se pudo observar que los modos encontrados en este trabajo están ligeramente desplazados con respecto a su correspondiente valor informado en la literatura. Esto puede ser una consecuencia de las diferentes condiciones de procesamiento de la muestra, así como por la pérdida de Bi debido al recocido. La Fig. 6 mostró la existencia del pico fuerte situado en 71,04 cm^{-1} (modo M_1) el cual está relacionado con la aparición del comportamiento ferroeléctrico de la película, además está relacionado con el movimiento de los enlaces Bi-O en la estructura del BFO

Otro aspecto importante observado en el estudio Raman es la fuerte intensidad del modo M_3 que de acuerdo a su posición de 137.57 cm^{-1} es muy próximo al modo A_1-1 reportado por otros investigadores. S. Gupta et al, reportan que este modo Raman es responsable del acoplamiento de orden magnético y eléctrico, y que su desplazamiento de 137.57 a 140.0 cm^{-1} se relaciona con un exceso del contenido de Bi dentro de la estructura del BFO. Así, los 13 modos de fonones activos Raman pueden mostrar ligeras diferencias en las posiciones de los picos según el tamaño de las partículas, y pueden deberse a los cambios en el desorden y el enlace del oxígeno [15].

Modo Raman	Posiciones (cm^{-1}) Trabajo actual	Reportados en la literatura	
	BFO	M. Nadeem et al. [16]	Kothari et al. [17]
M_1	71.04	77 (E)	71.39 (E)
M_2	111.02	108 (E)	98.36 (E)
M_3	137.57	140 (A_1-1)	135.15 (A_1-1)
M_4	169.71	172 (A_1-2)	167.08 (A_1-2)
M_5	219.87	---	218.11 (A_1-3)
M_6	268.07	219 (E)	255.38 (E)
M_7	289.50	270 (E)	283.0 (E)
M_8	315.68	310 (E)	321.47 (E)
	350.36	---	---
M_9	370.75	350 (E)	351.55 (E)
	411.87	---	---
M_{10}	434.51	408 (A_1-4)	430.95 (A_1-4)
M_{11}	472.94	468 (E)	467.6 (E)
M_{12}	528.19	553	526.22 (E)
	552.88	---	---
M_{13}	583.42	606 (E)	598.84 (E)

Tabla. 2. Los 13 modos de vibración Raman de la película de BFO en contraste con los reportados por otros investigadores.

D. Caracterización química

Es bien conocido que las propiedades multiferroicas de las películas delgadas de BFO están influenciadas por la densidad de corriente de fuga resultante de la fluctuación de valencia de iones de Fe y la vacante de oxígeno. Por lo tanto, resulta conveniente caracterizar los estados de valencia de cada elemento químico en la película. Para la muestra presentada en este trabajo, se tomó la medida en las regiones correspondientes al Bi 4f, Fe2p y O1s a temperatura ambiente

y a presión atmosférica. Luego para eliminar la influencia del carbón sobre la medición, se realizó una limpieza superficial con iones de argón por un periodo de 30 segundos. La Fig. 7 muestra las medidas XPS en donde los espectros han sido rotulados como “antes” de la limpieza y “después” de la limpieza, respectivamente. La Fig. 7a. muestra los espectros O1s ajustados en el intervalo de 525 eV a 534 eV para la película delgadas de BFO. Antes y después de la limpieza se observa un pico a 527.79 eV, el cual ha sido identificado con oxígeno en la red (O-red) y otro pico ubicado a 530.03 eV y que corresponde con vacancias de oxígeno en la estructura (O-defectos). La relación de concentración de O-red a O-defectos de la película delgada de BFO antes y después de la limpieza se calcula a partir del área máxima ajustada y los resultados son 17.4:82.6 y 31.1:68.9, lo que posiblemente es una consecuencia del recocido a alta temperatura y de la diferencia termal entre la interfaz sustrato/BFO y BFO/aire. Adicionalmente, se observó un pico de baja intensidad en la posición 531. 61 eV el cual ha sido identificado como y oxígeno adsorbido en la superficie. En general, el surgimiento de estos tres picos el espectro O1s es considerado representativo de la formación de vacantes de oxígeno en óxidos de tipo perovskita**.** La Fig. 7b. muestra los espectros Bi 4f ajustados en el intervalo de 153 a 165 eV para la película delgadas de BFO. Los picos de doblete obtenidos ubicados en 156,94 eV y 162,25 eV corresponden a las líneas centrales de Bi $4f_{7/2}$ y Bi $4f_{5/2}$ y se atribuyen a los enlaces Bi-O en las películas delgadas de BFO [18]. Entre los picos de Bi $4f_{7/2}$ y Bi $4f_{5/2}$, la energía de enlace calculada es de ~ 5,31 eV, lo que confirma la presencia de estados de valencia de Bi^{3+} en las películas delgadas de BFO. Después de la limpieza con argón se puede observar la presencia de dos picos intensos correspondientes a las posiciones 154.53 eV y 159.84 eV los cuales sugieren la formación de Bi^{2+} el cual está relacionado con la presencia de vacancias de oxígeno en la estructura del material. La Fig. 7c. muestra los espectros Bi 4f ajustados en el intervalo de 705 eV a 745 eV para la película delgadas de BFO. Se observó que antes y después de la limpieza, la película delgada mostró un pico de doblete correspondiente al Fe $2p_{3/2}$ a 708.682 eV y Fe $2p_{1/2}$ a 721.44 eV, respectivamente. La energía de división espín-órbita entre estos dos picos fue de 12.8 eV, lo que está muy cercano al valor teórico reportado de Fe_2O_3 [18]. De acuerdo con el análisis mediante el ajuste de los picos de $Fe2p_{3/2}$ y $Fe2p_{1/2}$ se observó la coexistencia de iones Fe^{3+} y Fe^{2+} antes y después de la limpieza de la película delgada de BFO. La relación de concentración de Fe^{3+} a Fe^{2+} calculada a partir del área del pico Fe $2p_{3/2}$ ajustado es 66.2:33.8 y 62.1:37.9 para película delgada de BFO antes y después de la limpieza, respectivamente. Así, Es bien conocido que las vacancias de oxígeno son sensibles a la formación de Fe^{2+}, que podría describirse mediante la siguiente ecuación [19]:

$$V_O^X + 2Fe_{Fe}^X \rightarrow 2Fe'_{Fe} + V_O'' + \frac{1}{2}O_2 \uparrow \quad (2)$$

$$3V_O^X + 2Bi_{Bi}^X \rightarrow 2V_{Bi}''' + 3V_O'' + Bi_2O_3 \uparrow \quad (3)$$

Donde Bi_{Bi}^X, Fe_{Fe}^X y V_O^X son los iones de bismuto, hierro y oxígeno en la red, V_{Bi}''', V_O'' son las vacancias de bismuto y oxígeno con tres y dos cargas positivas. vacantes de oxígeno, lo que a su vez aumenta la fuga eléctrica en BFO. Así, el principio de Le Chatelier, sugiere que la menor concentración de Fe^{2+} da como resultados valores menores de vacancias de oxígeno.

E. Caracterización óptica

La Fig. 8, muestra el espectro de transmitancia medido en rango espectral de 190–1100 nm. Los resultados indican que la película de BFO tiene un borde de absorción bien pronunciado a una longitud de onda de 300 a 450 nm, lo que probablemente esté asociado con la distorsión de la red en la película. Además, la presencia de un patrón de interferencia en la región de alta transmitancia sugiere que la película tiene una superficie uniforme con una interfaz FTO/BFO/aire bien definido.

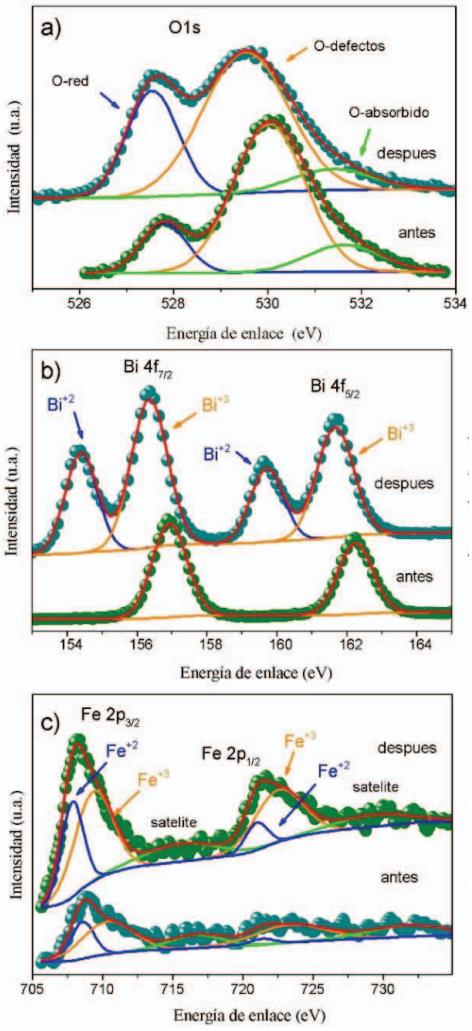


Fig. 7. Espectros XPS de la película depositada de BFO con energías de enlace correspondientes en las regiones a) O1s, b) Bi 4f y c) Fe 2p, respectivamente.

El valor de transmitancia mínima promedio en el rango visible de 400 a 700 nm fue de 53.2 % mientras que el valor máximo fue de 66.4 %. Estos resultados, indican que las películas tienen una buena calidad óptica, lo que puede deberse a las bajas pérdidas por dispersión o absorción. Con el propósito de aproximar el espesor de la película y conocer

el comportamiento de las propiedades ópticas, el espectro de transmitancia se modeló utilizando la teoría de dispersión de una multicapa de Lorentz (L) la cual está dada por la relación [20].

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 + \sum_k \frac{w_{pk}^2}{w_{ok}^2 - w^2 - i\gamma_k w} \qquad (4)$$

El ajuste del espectro de transmitancia obtenido utilizando este modelo, también se presenta en la Fig 8. El valor para el espesor de la película de BFO fue de 568 nm, el cual es muy cercano al encontrado anteriormente en el análisis SEM. Este resultado indica que existe una buena correspondencia entre los datos experimentales y el ajuste teórico del espectro de transmitancia del BFO.

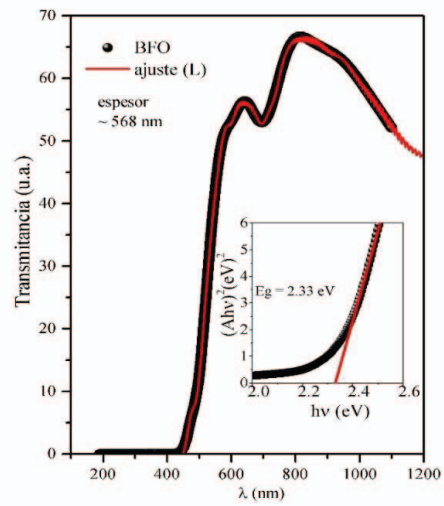


Fig. 8. Espectro UV-visible de la película delgada de BFO medido en el rango espectral de 190 nm a 1100 nm. El inserto muestra el gráfico de Tauc den donde se ha calculado el valor de la energía de banda prohibida.

Se determino del comportamiento de la energía de banda prohibida (E_g) de la película de BFO, la cual fue calculada mediante la conocida fórmula de Tauc :

$$(h\upsilon\alpha)^n = A\left(h\upsilon - E_g\right) \qquad (5)$$

Aquí, h, ν, α, A, E_g y n son la constante de Plank, la frecuencia de la luz, el coeficiente de absorción, una constante de proporcionalidad, la energía de banda prohibida, y índice de potencia que depende de la naturaleza de la transición, respectivamente. En el presente estudio se usó n = 2 para BFO porque el $BiFeO_3$ se comporta como un semiconductor de transición directa. El valor de E_g se estimó extrapolando la parte lineal de las gráficas de Tauc a conocer $(h\nu\alpha)^2 = 0$, como se muestra en la el inserto de la Fig. 8. El valor estimado de E_g fue de 2.33 eV aproximadamente. La densidad de corriente de fuga de la película BFO se muestra en la Fig. 9. El inserto, es una ilustración de la configuración de contactos metálicos Al/BFO/FTO estructurados para la medición de la relación de J-E. La densidad de corriente de fuga en 160 kV/cm para el BFO es 2.81 × 10−3 A/cm^2, aproximadamente. Este resultado califica a nuestra película delgada de BFO con propiedades eléctricas similares a los observadas en películas de BFO puro crecidas utilizando la misma técnica . En nuestro caso, creemos que la corriente de fuga de nuestra película de BFO es consecuencia de vacantes de oxígeno inducidas principalmente por la volatilización del Bi tal y como lo mostro la presencia de Fe^{2+} observada en el estudio XPS.

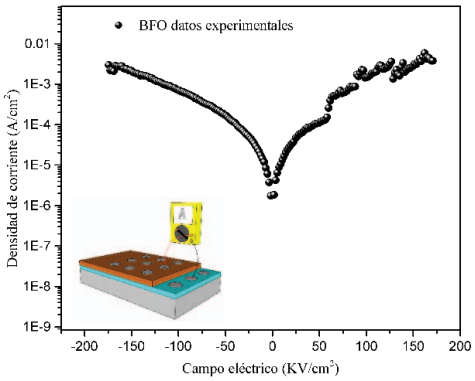


Fig. 9. Densidad de corriente de fuga de la película de BFO. El diagrama muestra la configuración utilizada para medir J-E

IV. CONCLUSION

En resumen, la película delgada de BFO se depositó con éxito sobre un sustrato de FTO/vidrio mediante un método de deposición de capas secuenciales. La caracterización de las propiedades morfológicas mostró que la película tiene una superficie no homogénea y porosa. Se observó la formación de aglomeraciones de granos nanométricos en la superficie de la película. El estudio de la sección mostró un recubrimiento uniforme con un espesor de aproximadamente 555 nm. Se encontró una distribución de tamaño de grano de 16 a 438 nm con un valor promedio de 117 nm. El estudio estructural y los modos de vibración Raman realizados en la muestra, revelaron la obtención de BFO puro sin la coexistencia de fases adicionales. El patrón de difracción describió la formación de BFO policristalino y que coincide con la estructura romboédrica y grupo espacial R3c. El análisis microestructural practicado mediante el refinamiento de Rietveld indicó un tamaño promedio de cristalitos de 31.32 nm y la presencia de 8.87 % de microdeformación residual asociada a la diferencia de variaciones térmicas experimentadas por el sustrato y la muestra durante el proceso de extracción de solvente y el recocido final a alta temperatura. Los análisis de espectros XPS revelan la coexistencia de iones Fe^{2+}/Fe^{3+} en la película. Además, se observaron picos satélites en la película antes y después de la limpieza con argón, lo que verifica la existencia de Fe en estado de oxidación 3+. El estudio de UV-visible mostró una que la película de BFO posee un borde de absorción bien pronunciado lo que probablemente esté asociado con la distorsión de la red en la película. Además, la presencia de un patrón de interferencia en la región de alta transmitancia sugirió que la película tiene una superficie uniforme con una interfaz FTO/BFO/aire bien definido. La aproximación del espesor de la muestra mediante le modelo de dispersión de Lorentz mostro 568 nm de espesor aproximadamente lo que

produce un error del 2.2% entre el obtenido mediante SEM y el obtenido del espectro óptico, lo que indica la buena concordancia entre estas técnicas para estimar el espesor de una película delgada. El valor estimado de E_g fue de aproximadamente 2.33 eV el cual está de acuerdo con los reportados para películas delgadas de BFO por otros investigadores. Se encontró en este estudio que la corriente de fuga de nuestra película de BFO es consecuencia de vacantes de oxígeno inducidas principalmente por volatilización de Bi, así como por la presencia de iones de Fe^{2+}.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo parcial del proyecto APY-GC-2019B-12. Además, se agradece al Sistema Nacional de Investigación de Panamá (SNI) por el apoyo a los autores de este trabajo. Finalmente, el investigador principal agradece al Dr. Orlando Auciello y al Dr. Manuel Quevedo del Laboratorio de Investigación en Ciencias Naturales e Ingeniería (NSERL) de la Universidad de Texas en Dallas (UTD) por los equipos de caracterización utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

[1] S. Cheng, Q. Xu, X. Hao, Z. Wang, . N. Ma y ·. P. Du, «Formation of nano-Ag/$BiFeO_3$ composite thin film with extraordinary high dielectric and effective ferromagnetic properties,» *J Mater Sci: Mater Electron,* vol. 28, p. 5652–5662, 2017.

[2] G. Chen, J. Chen, W. Pei, . Y. Lu, . Q. Zhang, Q. Zhang y Y. He, «Bismuth ferrite materials for solar cells: Current status and prospects,» *Materials Research Bulletin,* vol. 110, pp. 39-49, 2019.

[3] Y. Shirahata y T. Oku, «Characterization and Photovoltaic Properties of $BiFeO_3$ Thin Films,» *Coatings,* vol. 6, nº 4, p. 68, 2016.

[4] A. S. Priya, I. B. Shameem Banu y M. Chavali, «Influence of (La, Cu) Doping on the Room Temperature Multiferroic Properties of BiFeO3 Ceramics,» *Arabian Journal for Science and Engineering,* vol. 40, p. 2079–2084, 2015.

[5] J. Wu, Z. Fan, D. Xiao, J. Zhu y . J. Wang, «Multiferroic bismuth ferrite-based materials for multifunctional applications: Ceramic bulks, thin films and nanostructures,» *Progress in Materials Science,* vol. 84, p. 335–402, 2016.

[6] Y. Okamoto, R. Fukui, M. Fukazawa y . Y. Suzuki, «SrTiO3/TiO2 composite electron transport layer for perovskite solar cells,» *Materials Letters,* vol. 187, pp. 111-113, 2017.

[7] L. Bai, M. Sun, W. Ma, J. Yang, J. Zhang y Y. Liu, «Enhanced Magnetic Properties of Co-Doped $BiFeO_3$ Thin Films via Structural Progression,» *Nanomaterials,* nº 10, p. 1798, 2020.

[8] A. B. Kuzmenko, «Guide to ReFit,» *Accessed 7 Jan 2016,* 2014.

[9] A. B. Martínez, N. Godard, N. Aruchamy, C. Milesi-Brault, O. Condurache, A. Bencan, S. Glinsek y T. Granzowa, «Solution-processed $BiFeO_3$ thin films with low leakage current,» *Journal of the European Ceramic Society,* vol. 41, nº 13, pp. 6449-6455, 2021.

[10] Z. Lin, W. Cai, . W. Jiang, C. Fua, C. Li y Y. Song, «Effects of annealing temperature on the microstructure, optical, ferroelectric and photovoltaic properties of $BiFeO_3$ thin films prepared by sol–gel method,» *Ceramic International,* vol. 39, p. 8729–8736, 2013.

[11] F. El Akkad, y T. Paulose, «Optical transitions and point defects in F:SnO_2 flms: Efect of annealing,» *Applied Surface Science,* vol. 295, p. 8–17, 2014.

[12] Y. C. Hu, Z. Z. Jiang, K. G. Gao, G. F. Cheng, J. J. Ge, X. M. Lv y X. S. Wu, «Fluorine doping effects on the magnetic and electric properties of $BiFeO_3$,» *Chemical Physics Letters,* vol. 534, pp. 62-66, 2012.

[13] M. Nadeem, S. Khan, S. Husain, W. Khan, M. Shoeb y M. Mobin, «Significant enhancement in photocatalytic performance of Ni doped $BiFeO_3$ nanoparticles,» *Materials Research Express,* vol. 5.

[14] J.-P. Zhou, R.-J. Xiao, . Y.-X. Zhang, . Z. Shi y G.-Q. Zhu, «Novel behaviors of single-crystalline $BiFeO_3$ nanorods hydrothermally synthesized under magnetic field,» *Journal of Materials Chemistry C,* vol. 3, 2015.

[15] S. Gupta, M. Tomar y V. Gupta, «Raman spectroscopy of nanocrystalline Mn-doped $BiFeO_3$ thin films,» *Journal of Experimental Nanoscience,* vol. 8, nº 13, pp. 261-266, 2012.

[16] M. Nadeem, W. Khan, S. Khan, S. Husain, F. Singh, A. Ansar, D. K. Shukla, A. Ahad, . V. . K. Chakradhary y M. J. Akhtar, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* 2020.

[17] D. Kothari, V. R. Reddy, V. G. Sathe, A. Gupta, A. Banerjee y A. M. Awasthi, «Raman scattering study of polycrystalline magnetoelectric $BiFeO_3$,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* pp. 548-552, 2008.

[18] X. Deng, . Z. Zeng, R. Xu, ·. X. Qin, X. Li, Y. Wang, . R. Gao, Z. Wang, G. C. Gang Chen, W. Cai y C. Fu, «Efect of annealing atmosphere on structural and multiferroic properties of $BiFeO_3$ thin flm prepared by RF magnetron sputtering,» *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* 2019.

[19] C. M. Raghavan, J. W. Kim y S. S. Kim, «Effects of Ho and Ti Doping on Structural and Electrical Properties of $BiFeO_3$ Thin Films,» *J. Am. Ceram. Soc.,* vol. 97, p. 235–240, 2014.

[20] H. Miranda, S. Velumani, C. A. Samudio Pérez, J. C. Krause, F. D' Souza, E. De Obaldía y E. Ching-Prado, «Effects of changes on temperature and fluorine concentration in the structural, optical and electrical properties of SnO_2:F thin films,» 2019.

Effects of tropical climate on public buildings in Panama

Efectos del clima tropical sobre edificaciones públicas de Panamá

C. Hernández
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
cecilio.hernandez@utp.ac.pa

J. Villar
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
jesus.villar@utp.ac.pa

J. De La Cruz Sánchez
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
jose.sanchez@utp.ac.pa

A. Avendaño
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
alejandro.avendano@utp.ac.pa

F. Vergara
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
fidedigna.vergara@utp.ac.pa

E. Escobar
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
ernesto.escobar@utp.ac.pa

A. Espinosa
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
alma.espinosa@utp.ac.pa

***Abstract*—This paper presents data on the levels of pH, soluble salts and corrosion potential, of concrete from buildings that are up to 30 years old, in order to investigate its condition and preservation. The results suggest evident effects of the carbonation phenomenon, obtaining pH values in the order of 9 units. In addition, the presence of salts such as chlorides and soluble sulfates does not correlate with this reduction in pH or with the levels of corrosion potential that fall into the range of low probability of corrosion mostly, mostly obeying the affectation to environmental CO2.**

Keywords— Durability; pH in concrete; chlorides in particular; corrosion.

***Resumen* — En el presente trabajo se presentan datos sobre los niveles de pH, sales solubles y potencial de corrosión, del concreto procedente de edificaciones que tiene edades hasta de 30 años, con el objeto de indagar su condición y preservación. Los resultados sugieren efectos evidentes del fenómeno de carbonatación obteniéndose valores de pH en el orden de 9 unidades. Además, la presencia de sales como cloruros y sulfatos solubles no se correlaciona con esta reducción de pH ni con los niveles de potencial de corrosión que caen en el rango de baja probabilidad de corrosión mayormente, obedeciendo mayormente las afectaciones al CO2 ambiental.**

Palabras claves — Durabilidad; pH en el concreto; cloruros en concreto; corrosión.

I. INTRODUCCIÓN

La inversión pública en materia de infraestructura constituye bienes de gran valor que deben ser preservados [1, 2]. Para ello se hace necesario determinar propiedades químicas y físicas que indique su condición actual y su durabilidad potencial. Para ello a través del presente trabajo se pretende efectuar una evaluación de unos 30 edificios públicos, los cuales se les han determinado diversas propiedades, como el pH, sales solubles y potencial de corrosión. El pH orienta sobre la calidad del concreto y las posibles afectaciones que pueda estar experimentando. En el concreto fresco tiende a ser alcalino, con un pH superior a 12 unidades. De manera que los valores de un concreto con pH mayores a 11 unidades, se puede considerar que se encuentra en buen estado. Si encontramos valores menores sugiere que ha estado experimentando interacciones químicas indicativas de su degradación [3,4,5,6]. Previo a la intervención de la losa de concreto expuesta, se evalúa el daño potencial por corrosión que ha experimentado su armadura o acero de refuerzo, a través del ensayo de potencial de corrosión de media celda, que consiste en el desplazamiento del electrodo de referencia, sobre la superficie del concreto, registrando las lecturas de diferencia de potencial de voltaje en las áreas seleccionadas, cuyos valores, entre el acero expuesto de la armadura, y el electrodo de referencia, sugiere su afectación o el grado de protección de la estructura evaluada. Para garantizar un buen contacto se humedece la superficie del hormigón. El polo positivo se conecta a las armaduras y el polo negativo o de referencia, sobre el hormigón [7,8]. La norma ASTM C876 [9], establece una serie de rangos de valores de diferencia de potencial, para los cuales se espera un cierto criterio de riesgo potencial en la que las estructuras de acero reforzado pueden estar en mayor o menor nivel de riesgo potencial a corrosión. El ensayo permite identificar el grado protección del concreto y las áreas relativamente susceptibles a la penetración de contaminantes como las sales de cloruros y sulfatos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Preparación de la muestra para análisis químicos

De cada edificación o estructura de concreto seleccionada, se extrajo diversos núcleos de 2 pulgadas de diámetro, de los cuales se obtiene una sección, que incluye el área expuesta al exterior, con una masa próxima a 100 gramos, que se tritura

978-1-6654-9843-2/22/$31.00 ©2022 IEEE
DOI 10.1109/IESTEC54539.2022.00132

en un mortero de porcelana hasta un tamaño inferior a 100 µm, que se utiliza para los análisis químicos.

2.2. Análisis Químicos

La preparación de la muestra para el análisis del pH se efectuó de acuerdo a la norma ASTM D4262 [10], para lo cual se preparó un extracto acuoso de la muestra de polvo de concreto:agua desionizada en una proporción 1:10 (10 gramos en 100 mL), que se deja reposar por unos 30 minutos. El pH del extracto se determina de acuerdo al método 4500-H^+ B, del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition, 2017, APHA-AWWA-WEF [11], utilizando un potenciómetro Orión Versa, modelo VSTAR90. Entre lecturas se lava el sensor de pH con agua desionizada para minimizar la contaminación entre muestras. Para el análisis de cloruro soluble en agua, extraíble del concreto endurecido, para la fase de preparación fue efectuado de acuerdo a la norma ASTM C1218 [12], en la que se pesa 10 gramos de concreto pulverizado, se añade 75 ml de agua desionizada, se deja bajo reacción por 24 horas, se filtra, y el análisis se efectuó por el método volumétrico 4500-Cl^- B del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition, 2017, APHA-AWWA-WEF [13]. Para los sulfatos la preparación es según la norma ASTM C1580 [14], por espectrofotometría UV-Visible, a una longitud de onda de 420 nm, analizando el precipitado de sulfato de bario formado, luego de la adición de cloruro de bario dihidratado.

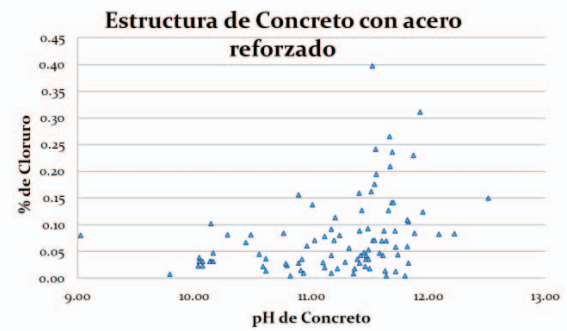
2.3. Ensayo de potencial de corrosión

Se utilizó un medidor de potencial de media celda, marca Humboldt, modelo H-2872, que consta de un voltímetro, el cual hace contacto con la armadura expuesta y con la superficie del hormigón. El ensayo se realiza de acuerdo con la norma ASTM C876 [9]. Se suele efectuar un mapeo sobre la superficie estudiada. El equipo presenta de forma directa la lectura del potencial de media celda.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1.Análisis químicos

Se efectuó un volumen importante de losas ensayadas. Para fines gráficos en presentan gráficos comparativos y sólo los valores promedio respectivo. En la Figura 1a se presenta la relación del pH y los cloruros solubles respecto a la masa de cemento.



(a)

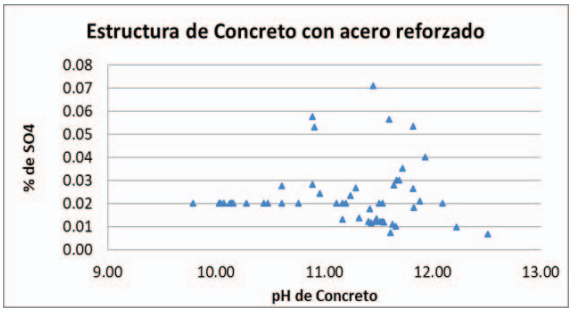
Valores	pH	% Cloruro respecto a la masa de cemento
Promedio	**11.20**	**0.08**
Máximo	12.51	0.40
Mínimo	9.03	0.005

(b)

Fig. 1. (a) Relación del pH con los cloruros solubles respecto a la masa de cemento del concreto y (b) Valores promedios, máximos y mínimos de ambas variables.

Se trata de concreto con una edad próxima a 30 años en promedio. Asumiendo valores en el orden de 2500 Psi, y según la ACI 311, la cual establece un límite de 0,30 % de cloruros respecto a la masa de cemento, se puede observar que la mayor parte de los resultados se encuentran dentro de este rango. Hay niveles de pH bajos < a un pH de 10, pero que obedecen a los efectos del tiempo y a la carbonatación, pero que no se pueden correlacionar a la incidencia de los cloruros.

En la figura 2 se observa la relación de los sulfatos con el pH, en la que se puede observar valores relativamente bajos de sulfatos, y además tampoco hay una correlación con los niveles de pH.



(a)

Valores	pH	% SO_4 respecto a la masa de cemento
Promedio	**11.12**	**0.023**
Máximo	12.51	0.071
Mínimo	9.79	0.007

(b)

Fig. 2. (a) Relación del pH con los sulfatos solubles respecto a la masa de cemento del concreto y (b) Valores promedios, máximos y mínimos de ambas variables.

En cuanto a la relación entre los sulfatos y los cloruros, que se presenta en la figura 3, no se observa una relación sinergética entre ambas variables.

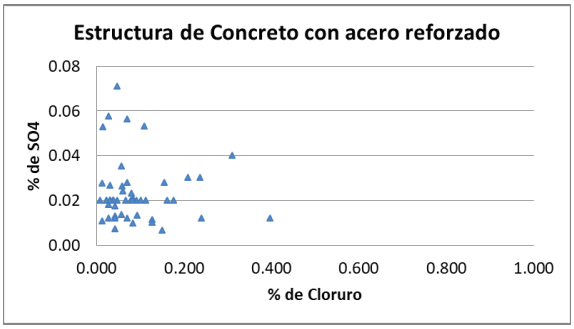


Fig. 3. Relación de los sulfatos solubles respecto a los cloruros, ambos respecto a la masa de cemento del concreto

3.2. Potencial de media celda

La norma ASTM C876 establece que para valores de diferencia de potencial mayores a -120 hay un 10% de probabilidad de que ocurra la corrosión, para valores menores a -270 la probabilidad aumenta a 90 % y de -120 a -270 se considera una región de incertidumbre.

Potencial de media celda ASTM C 876	Rango de ocurrencia de corrosión	Probabilidad de ocurrencia de corrosión
-68	> -120 V	10%
-10	> -120 V	10%
-17	> -120 V	10%

Fig. 4. Resultados promedios del Potencial de media celda.

Los valores observados en la figura 4, > -120 V, agrupados en función de tres (3) zonas objeto de estudio, sugieren que no hay efectos corrosivos significativos en todas las estructuras evaluadas.

Imágenes preliminares por microscopía metalográfica, confirman que en efecto no se observan niveles de defectos microestructurales en el acero de refuerzo de muestras de concreto reforzado seleccionadas, como se aprecia en la figura 5.

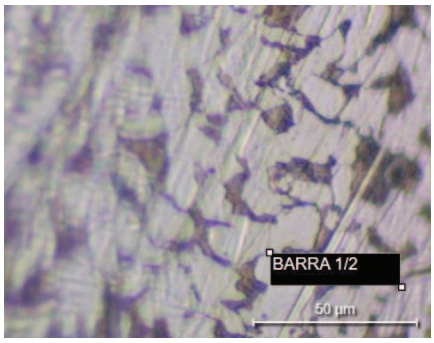


Figura 5. Microestructura de acero de refuerzo

IV. CONCLUSIONES

De los resultados se puede observar un efecto directo del clima sobre las estructuras evaluadas, por el fenómeno de carbonatación. No se observa efectos directos de sales como los cloruros y los sulfatos, pues su presencia relativa es baja, sin embargo, sus efectos acumulativos en el tiempo no se pueden descartar. Los potenciales de corrosión, que están mayormente en el rango de poca probabilidad de corrosión, igualmente indican que la acción de la degradación del clima sobre el concreto, obedece fundamentalmente al efecto de CO_2 ambiental, y en menor grado a la presencia de sales como los cloruros o los sulfatos.

AGRADECIMEINTOS

Los autores agradecen el apoyo del trabajo al proyecto SENACYT **IDDS22-38** "*Impacto del clima tropical y marino de Panamá sobre la durabilidad de edificaciones públicas sensitivas*".

REFERENCIAS

[1] Echevarría, J. y Palacios, E. (2011). Principales causas y posibles soluciones de las reclamaciones a nivel patológico en sistema de edificaciones porticadas, [Trabajo de Grado para optar por el título de Especialista de Construcciones, Universidad de Medellín, Colombia], p. 21. https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/1113/Principales%20causas%20y%20posibles%20soluciones%20de%20las%20reclamaciones%20a%20niveli%20patol%C3%B3gico%20en%20sistemas%20de%20edificaciones%20porticadas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[2] Hernández, O. y Mendoza, C. (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, Scielo: Ingeniería, Investigación y Tecnología, México, 17(1). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432006000100005

[3]Villarroel, V., Delgado, D., Carvajal, A., De Barbieri, F. y Tronconi, O. (2009). Influencia de la acción del Medio Ambiente ante la durabilidad del concreto, Proyecto DURACON, Revista de la Construcción, Chile, Vol. 8. https://repositorio.uc.cl/handle/11534/28857

[4] Moreno, E. Ayuso-Blanco, F., Torres, A. y Troconis, O. (2009). Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (Proyecto DURACON) [Archivo PDF], Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México, Revista Ingeniería, 13(3), 53-60. https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen13/efecto_ambiente.pdf

[5] Qing, F., Beixing, L., Jiangang, Y. y Xiaolu, Y. (noviembre 2017). Microstructural and Microanalytical Study on Concrete Exposed to Sulfate Environment [Discourse]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

[6] Pérez, J. (2007). Evaluación de macroceldas en vigas de concreto reforzado bajo ambiente salino [Archivo PDF], Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technical,

Año XIII, 485-590. file:///C:/Users/aldac/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeMacroceldasDeCorrosionEmbebidosEnVigas-4798457.pdf

[7]Zamora, M., Mendoza, D., Zamora, H. y Calderón, F. (2008). Monitoring of corrosion Potential and Mechanical Resistance of Contaminated Concrete Exposed to a Chlorinated Environment, 237-246. http://www.scielo.mec.pt/pdf/pea/v27n3/v27n3a06.pdf.

[8] Andrade, C. y D´Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como un parámetro de control del hormigón y su durabilidad [Archivo PDF], Revista ALCONPAT, 1(2), 90-98. file:///C:/Users/aldac/Downloads/8-Original%20Article%20Text-15-4-10-20160519.pdf.

[9] ASTM C876 , Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

[10] ASTM C4262, Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces

[11] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition, 2017, APHA-AWWA-WEF. método 4500-H^+ B

[12] ASTM C1218, Standard Test Method For Water-soluble Chloride In Mortar And Concrete

[13] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition, 2017, APHA-AWWA-WEF. método 4500-Cl^- B

[14] ASTM C1580, Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil

Author Index

Acosta, Leomar 560, 647
Aguilar, Franck 747, 779
Aguilar Pinzón, Orlando 463
Albo-Canals, Jordi 678
Albuja Mariño, Patricia Alexandra 330
Alpiste Penalba, Francesc 347
Alvarez, Humberto 279
Alvarez, José C. 116
Álvarez, Vivianne 608
Alvarez-Suarez, Ana 398
Amador, Cassio H. S. 309
Amarante, Beatriz G. 360
Amarante-Segundo, Gesil S. 309, 360
Ambrosio-Flores, Kevin Luis 17
A. Mendes Rossa, Pedro 309
Arana, Johan 190
Araújo e Silva Ferraz, Gabriel 376
Ardila-Rey, Jorge Alfredo 595
Arevalo Chafuel, Diego Armando 122
Åstrand, Elaine 432
Auciello, Orlando 796
Aux, Juan Diego 190
Avendaño, A. 810
Ávila, Gabriela 440
Baldeón Egas, Paúl Francisco 330
Barbari, Matteo 376
Barbieri, Giacomo 541
Barrera-Buitrago, Dayana 342
Barrera Buitrago, Dayana Alejandra 347
Barría, Nicole 632
Barría A., Salomón 758
Batista, Aldo 589
Batista, Manuel 393
Becciolini, Valentina 654
Bedin Marin, Diego 376, 654
Berbey-Alvarez, Aranzazu 9
Bernal, Bolívar 364
Bernal Mojica, Bolívar 46
Bernal-Mójica, Bolívar 387
Berrocal, Diana 620
Blanco, Luis 493
Blanco G., Fabian 293
Blandon, Juan 620
Bonilla Cedeño, Jorge Alberto 92
Borrero, D. 627
Boya-Lara, Carlos 223, 595, 673
Brischetto, Salvatore 723
Brito, Raquel S. 309
Broce, K. 627
Broce, Kathia 426, 602
Buenaño, Ramsés 560, 647
Caballero, Cristhian 162
Caballero, Ricardo 108
Caballero, Rony 9
Caballero-Gonzalez, Yen 354
Caballero-González, Ricardo 387
Cabrera, Olenka 116
Cabrera-Gil-Grados, Ezilda 17
Cáceres, Danilo 665
Caldas, Oscar I. 398
Calderon, Darla 413
Calderón, Sallelis 707
Calvo, José 287
Camacho Hernandez, Jesus Nain 740
Camargo-Henríquez, Ismael 251
Camargo-Hernríquez, Ismael 273
Campos, Alfredo 747, 752, 779
Cano, Elia 244
Cantero Guisández, José Luis 715
Cárdenas, Cenobio 458
Cardenas-Torres, Rossember Eden 498
Carrasquilla-Batista, Arys 659
Castañeda Vilatuña, Marcelo Fernado 122
Castillero, Roberto 279

Castillo, Aris 287
Castillo, B. 184
Castillo, Bryan 190
Castillo, Juan 273
Castillo Sequera, José Luis 208
Castrellón, María Gabriela 567
Cedeño Martínez, Cristel Julissa 154, 528
Cedeño Martinez, Cristel Julissa 616
Cedeno-Moreno, Denis 197
Centella, Miriam 707
Chacón, Manuel Alejandro 758
Chavarro, Ricardo 303
Chávez Rodríguez, Yovani Edgar 53
Chen Austin, Miguel 463, 508, 541, 608
Ching-Prado, Eleicer 764, 784, 802
Clunie, Clifton 266
Collado, Edwin 707
Collao-Diaz, Martin 73, 87
Concepción Patiño, Dimas Hernán 231
Condori, Cristóbal 560, 647
Crredidío, Ángel 784
Cruz, Edmanuel 244
Cubilla, Osiris 560, 647
Cubilla-Montilla, Mitzi 445, 453
Deago, Euclides 370, 469, 485, 516, 521, 554, 589, 602
Deago, Hector 632
de Brito, Paulo Eduardo 790
De León, Lissette Lirieth 541, 608
Delgado, Daniel Ricardo 498
Delgado S., Rodney 758
Demirkesen, Sevilay 116
de Obaldia, Elida 287, 796
de Obaldía, Elida 802
de Oliveira Faria, Rafael 654
de Sanfilippo, Edilsa Q. 46
Destro, Tisla 733
Dias, Filipe 299
Díaz Álvarez, José 715
Diaz-Garay, Bertha Haydee 38
Diaz-Quintero, Maria 337
Ekström, Mikael 432
Enders, Bernhard G. 309
Enders, Bernhard Georg 790
Escobar, E. 810
e Silva Ferraz, Gabriel Araújo 654
Espino, Kleveer 370, 516, 616
Espino Cedeño, Kleveer Abilio 381
Espinosa, A. 810
Espinosa, Angel 215
Espinosa, Yahaira 426
Espino-Sanchez, Sharon Cynthia 25
Esquivel, Jaime 279
Fábrega, José 548, 567, 616
Fábrega Duque, José Rogelio 381
Fábrega-Duque, José R. 528
Fábrega-Duque, José R 536
Fernandes, Horácio 258
Fernandes, Horacio 299, 309, 790
Fernandes, Horário 360
Fernández, Horacio 287
Fernández, Ingrid Milena 575
Fernandez-Albujar, Christian 61
Fernández Pérez, Juan 715
Ferreira Ponciano Ferraz, Patrícia 376
Flores, Javier Antonio 728
Flores Hidalgo, Brenda Lorena 1
Flores-Pérez, Alberto 32
Flores-Perez, Alberto 61, 68, 73
Fong, Amaly 238
Forero S., Pedro A. 293
Fossatti, Anibal 560, 647
Franco, Abelardo 413
Franco Chávez, Abelardo del Carmen 381
Frías G., Joseph 758

Gallardo, José 162
Garcia-Angulo, Sebastian 68
García Córdova, M. en C. José Manuel 1
Gil, J. F. 184
Gómez, Margie 560, 647
Gómez, Víctor 504
Gómez, Victor 536
Gomez-Barrera, Daniel Fernando 790
Gómez Mendoza, Luis Fernando 208
Gonzales-Romero, Anthony 38
González, A. 627
González, Alexandra 528, 536
González, Ana 602
González, Enith 46
González, Guadalupe 287
González, Jinela 541
González, Ruth 445
González, Yarisel 458
González, Yeraldin 554
Gonzalez-Fallas, Andres 204
González Mancera, Andrés 541
Gonzalez-Serrud, Sergio 100
González Valoys, Ana Cristina 381
Grajales-Saavedra, Francisco 170, 176
Grey G., Ariel A. 458
Grimaldo, Gabriel 684
Guaminga Pillajo, Edwin Eduardo 122
Guerra-Chanis, Gisselle 440, 504, 536
Guerra de Castillo, Zoila Yadira 364
Guerra-Sancho, Antonio 715
Guerrero, Bernardo 393
Guevara-Cedeño, Jessica 582, 589
Guillén-Pérez, Victor 387
Guillén Pérez, Victor 405
Gutiérrez, Eric 733
Harris, Itamar 620
Hellström, Per 432
Henriques, Rafael 299, 309, 790
Henríquez, Félix 477, 699
Henríquez-Espinosa, Felix 9
Henríquez-Rivera, Dina 426
Hernández, C. 627, 810
Hernández, Carola 303
Hernández, Cecilio 602
Hernández Rodríguez, Luis Tinerfe 122
Herrera, Diana Carolina 342
Herrera Muñoz, Diana Carolina 347
Ho, Carlos A. 560, 647
H. S. Amador, Cassio 360
Huamani-Martinez, Ibett Johana 38
Huamán Vizconde, Sofía 208
Hurtado Moreno, Juan José 1
Isaza-Gonzalez, José 273
Jaén, María 508
Jaén Ortega, Antonio Alberto 432
James, Arthur 420, 554, 602, 620
James Rivas, Arthur 485
Jarufe-Majluf, Francesca Maria 73
Jiménez, José Ulises 381
Jiménez, Ulises 370
Joyanes Aguilar, Luis 266
Kociak, Mathieu 779
Krause, Joao Carlos 784
Kuriščák, Pavel 258
Kurt, Zohre 420
Laguardia, José Javier 728
La Rosa-Arizaga, Leslie 61
Lazo-de-la-Vega-Baca, María 17
Lee, Kevin 589
Lee Barry, Michelle 176
Leiva, Jorge A. 548, 567
León, Celinda Pérez-De 387
Leonelli, Paolo 752

Li, Xiaoyan 779
Liberato-Arenas, Anderson 87
Link, Guido 740
Llontop, José 116
Lloyd, J. 627
Lloyd, Javier 602
Long O., Dilio Alberto 723
López, Nidia Lugo 342
López, Víctor 279, 678
López Cabrera, Victor 684
Lorenzo, Milagros 567
Lozano, Javier 146
Lozano, Luis 707
Mack-Vergara, Yazmin L. 316
Marín, Nacarí 771
Martez, Nuvia Gisela 46, 79
Martin, Yoel 477
Martinez, Nathalia 108
Martínez, Ernesto 733
Martínez, Nakediryai 678
Martínez L., José S. 691
Marulanda Case, Johannio 138
Masapanta-Carrión, Susana 130
Matus, Ericka 393
Mc Naughton Perea, Yarleny Jurieta 154
Melgar, Orlando 413, 477
Mendes Rossa, Pedro A. 790
Méndez, Rosalín 560, 647
Mendoza, José 699
Mendoza, Luis 554
Miguélez Garrido, María Henar 715
Miller, Norma 324
Miranda, Héctor 747, 752, 802
Miranda, Hector 784
Mogollón, Luis 477
Mojica, Alexis 560, 647
Molino, Jay 393
Moncayo, Sofia 303
Montero, Damián 747
Montero, Pablo 560, 647
Montes, Héctor 699
Montes Hincapie, Juan Manuel 364
Mora, Dafni 541, 608
Mora G., Dafni Y. 381
Morales, Juliette 238
Morales, Roberto 393
Morán, Manuel 548
Moreno, Bruno 162
Moreno, Cristian Yesid 303
Moreno, Jully Andrea 575
Moreno, Sidia 364
M. R. Cruz, Junio 309, 360
M. Ribeiro, Alice 360
Muñoz, Lilia 231, 238
Muñoz, Melisabel 548, 567
Muñoz, Sebastian 575
Navarro, Nila 197
Neira-Quintero, Laura Daniela 342
Ng, Diana 493
Noel, Job 521
Noel Amaya, Job Osvaldo 616
Norberto Pereira, Rodrigo 376
Nunez, Ivonne 244
Núñez-Bernal, Yarisel 251, 273
Núñez Pugarín, Víctor Andrés 130
Obaldia, Elida 299
Olmos, J. 627
Olmos, Jorge 426, 602
Olmos, Rolando 108
Ortega, Edgar 176
Ortega Del Rosario, Maria de los A. 620
Ortega Del Rosario, Maria De Los Á. 723
Ortega Del Rosario, Maria De Los Angeles 432

Ortega Del Rosario, María De Los Ángeles 469
Ortiz, Claudia Patricia 498
Ortiz, Erick 554
Ortiz-Leon, Gabriela 659
Pardo, César 231
Paredes, Gustavo 575
Paredes-Carrasco, Alvaro 73
Paredes Vásquez, Fredi Augusto 130
Pena Barata, Rafael Alexandre 654
Penalba, Francesc Alpiste 342
Peñalba Achurra, Vanesa 493
Pinto Nuñez, Milagros 154
Pittí-Pinzón, Yamileth 387
Pittí Pinzón, Yamileth 405
Poveda, Héctor 223
Prens, Josué 420
Quintero, Sharick Vides 138
Quintero-Fuentes, Natividad 337
Quiroz-Flores, Juan Carlos 17, 25, 32, 38
Ramírez, Joisleen 420
Ramírez, Marian 516, 554
Ramirez, Juan Gabriel 790
Ramírez Salado, Joisleen 485
Rangel, Jose Carlos 215
Recalde, Henry 330
Resende Andrade, Rafaella 376
Reyes, Estephany 771
Ribé, Jordi Torner 342
Rivas, Jannery 223
Rivera, Ana K. 508
Rivera-Caballero, Omar 595, 673
Rivera S., Gustavo A. 293
Roach-Rivas, Giancarlo 324
Rodriguez, Carlos F. 640
Rodriguez, Carlos Francisco 303
Rodriguez, Humberto 684
Rodriguez, Stephania 162
Rodríguez, Carlos F. 790
Rodríguez, Esther 440
Rodríguez, Humberto 691
Rodríguez, Rita 733
Rodríguez, Zuri 608
Rodriguez-Martinez, Kexy 337
Rosales, Héctor 405
Rosales Huamaní, Jimmy Aurelio 208
Rossa, Pedro 258, 299
Rossi, Giuseppe 376, 654
Rovetto, Carlos 244
Ruíz, Michelle 316
Ruiz-Santaquiteria, Marta 458
Saenz, Esaú 582
Sáez, Yessica 707
Saito, Carlos 536
Salazar, E. 627
Salazar, Elizabeth 602
Saldana-Barrios, Juan Jose 244
Salias, Adis 516
Samudio, Carlos Ariel 784
Sanchez, Érica 567
Sanchez, Mabony 796
Sánchez, J. De La Cruz 810
Sánchez, Xavier 616
Sanchez-Galan, Javier E. 324
Sánchez Galán, Javier 393
Sánchez Hidalgo, Graciela Cecilia 469
Sandoval, Hillary 733
Sans, Olga 678
Santana, Luys 393
Santos, José 632
Santos, Manuel 309, 790
Santos, Manuel B. 299
Santos Santana, Lucas 654
Schwerz, Felipe 654

Serracín, Brenda Cecilia 381
Serrano, Jesús 146
Serrano R., Jorge 405
Silva, Eduardo 560, 647
Silva, João Nuno 258
Silva de Moura, Raquel 376
Simanca H., Fredys A. 293
Singh Gustavino, María Luisa 79
Smolarz, Andrzej 244
Solis, Yinela 733
Stein, Benjamin 796
Sustaita, Alan 707
Tejeda, Joselyn 116
Tejedor, Wedleys 413
Tejedor Espinosa, Wedleys Walker 381
Tejedor-Espinosa, Wedleys 387
Tejedor Flores, Nathalia 445
Tejedor-Flores, Nathalia 453
Tellez-Risco, Valeria 32
Thomson, P. 184
Thomson, Peter 138, 190
Tineo-Morales, Maria Gracia 68
Tique Escobar, Diana Lorena 347
Toasa, Renato 330
Toppin, Lydia 678
Toro Lozano, Danilo 79
Torres, Bryan Castillo 138
Torres-Cubilla, Carlos 453
Torres-Payoma, Freddy 342
Torres Payoma, Freddy Alexander 347
Vallester, Erick 521
Vanegas, Freddy Zapata 541
Vargas, Ramiro 146
Vasquez, Sorhay 393
Vasquez-Ortiz, Andrea Ximena 25
Vasquez Torres, Jayguer 266
Vela-Linares, Juan Jose 32
Velastegui Balda, Gabriel Edmundo 122
Vera Vélez, Brayan Alejandro 122
Vergara, F. 810
Vergara, Gabriel 46
Vilchez-Monge, Marta 659
Villalobos-Villegas, Jervis 659
Villar, J. 810
Villarreal, Eymi 575
Villarreal, José E. 420
Villarreal, Vladímir 231
Wang, Kui 771
Watson, Amanda 784
Yau, Yesica 170
Yorett, Geraldine 521
Zárate, Víctor 665