

Vol. 18, nro. 1 (2026)

ISSN(e): 2528-7788

aci

avances
en ciencias e
ingenierías



USFQ
PRESS



aci

avances
en ciencias e
ingenierías

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es una revista científica internacional, multidisciplinaria y de acceso abierto diamante, publicada dos veces al año (mayo y diciembre) en inglés y español.

Editores en jefe / Editors-in-Chief

Oscar Camacho
Colegio de Ciencias e Ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Mateo Dávila-Játiva
Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Editores asociados / Associate Editors

Eva O.L. Lantsoght
Colegio de Ciencias e Ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y
Department of Engineering Structures,
Delft University of Technology, Países Bajos

Elisa Bonaccorso
Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Edgar Carrera Jarrín
Colegio de ciencias e ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Dennis Cazar Ramírez
Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Laura Céspedes Arias
Committee on Evolutionary Biology, The University of
Chicago, Field Museum of Natural History, United States

Sebastián Ponce
Colegio de ciencias e ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Patricio Rojas Silva
Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Gabriel Trueba Piedrahita
Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Jordi Aguiló Gisbert
Departamento de Medicina y Cirugía Animal,
Universidad Cardenal Herrera CEU, España

Consejo editorial / Editorial Board

Daniela Almeida Streitwieser
Reutlingen University, Germany

César Iván Álvarez-Mendoza
Universität Augsburg, Alemania

John Blake
University of Florida, Estados Unidos

María de Lourdes Torres
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Salvador Godoy
Instituto Politécnico Nacional, México

Juan Manuel Guayasamín
Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Johannio Marulanda Casas
Universidad del Valle, Colombia

Oswaldo Morales Nápoles
Delft University of Technology, Países Bajos

Yenisel Plasencia-Calaña
Maastricht University, Países Bajos

Luis Rincón
Universidad de Los Andes, Venezuela

Santiago Ron Pontificia
Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

Carlos Ventura
The University of British Columbia, Canadá

Rebeca García García
Tecnológico de Monterrey, Mexico

Comité científico internacional / International Scientific Committee

Nicole Acosta-Vásquez
University of Hamburg, Germany

Rafael Angarita
Institut Supérieure d'électronique de Paris (ISEP), France

Carlos Jaime Barrios
Universidad Industrial de Santander, Colombia

José António Baptista Machado
Universidade dos Açores, Portugal
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Bertrand Berche
Université de Lorraine, France

Montaña Cámara Hurtado
Universidad Complutense de Madrid, Spain

Daniel Cardoso Pontificia
Universidad Católica de Río de Janeiro, Brazil

José Cerca
Universidad de Oslo, Norway

Rolando Chacón
UPC BarcelonaTECH, Spain

Patricia Conde Cespedes
ISEP - école d'ingénieurs du numérique, France

Livio Conti
Università Telematica Internazionale Uninettuno, Italy

Alex Micael Dantas De Sousa
São Paulo State University (UNESP), Brazil

Antonio Di Teodoro
Universidad de Deusto, Spain

Rafael Fierro
University of New Mexico, United States

Sarah Fitzpatrick
Michigan State University

Francesca Giampieri
Università Politecnica delle Marche, Italy

Juan J. Gude
Universidad de Deusto, Spain

Paula Folino
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Claudia A. Garrido DWI –
Leibniz-Institut für Interaktive Materialien, Germany

Esteban Garzón
Università della Calabria, Italy

Gabriela Guevara
Technische Universität Berlin, Germany

Isidoro Gitler
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados of the
National Polytechnic Institute (CINVESTAV), Mexico

Jaime Gonzalez-Libreros
Luleå Tekniska Universitet, Sweden

Carlos Graciano
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Eloisa Hasing
University of Alberta, Canada

Jorge Humberto Heredia
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Cristina Ana Mantilla Suarez
University of Virginia, United States

Victor Murray
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, United States

Francisco Javier Morales Yáñez
Université de Liège, Belgium

Santiago Paredes
The University of Edinburgh, United Kingdom and CERN,
Switzerland

Tiziano Perea
Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico

Horacio Pérez-Sánchez
Universidad Católica San Antonio de Murcia, Spain

Francisco Rossomando
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Jose David Ruiz Alvarez
Universidad de Antioquia, Colombia

Monica Santamaría-Ariza
University of Minho, Portugal

Rafael Sanabria Díaz Delft
University of Technology, the Netherlands

Rinaldo Santonico
Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Italy

Fabian Salgado-Roa
University of Texas at Austin, United States

Melissa Schumacher G.
Universidad de las Américas Puebla, Mexico

Luca Sorriso-Valvo
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy

Matías Valenzuela
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Julio Valdivia-Silva
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Peru

Miguel Reina Ortiz
Indiana University, United States

Paula Rojas
Universidad Adolfo Ibáñez, Chile

Julio E. Terán
NC State University, United States

Adriana Urcan
University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine of
Cluj-Napoca, Romania

Catalina Palacios
SELVA, Colombia

Producción editorial

USFQ PRESS

Corrección de estilo y ortotipográfica

Alejandra Larrea, Reema Azar y Janine Berger

Gestora

Karen Moyano

Diseño y diagramación

Krushenka Bayas Ramírez

Fotografía de cubierta

Martín Carrera

Webmaster y manejo de OJS

Scimago



Esta obra está bajo una licencia **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)**. El uso de nombres descriptivos generales, nombres comerciales, marcas registradas, etcétera, en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que estos nombres están exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por tanto, libres para su uso general.

USFQ Press y el equipo editorial de *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* han aplicado el mayor cuidado razonable en los procesos de selección, revisión por pares, edición y publicación. Sin embargo, no puede excluirse la posibilidad de que el contenido publicado contenga errores, imprecisiones u omisiones. Los contenidos son de exclusiva responsabilidad de sus autores.

Para correspondencia, comunicarse con:

Oscar Camacho y Mateo Dávila-Játiva

Editores en jefe

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Calle Diego de Robles S/N Pampite.

Campus Santiago Gangotena

Quito 170901, Ecuador.

Correo electrónico:avances@usfq.edu.ecusfqpress@usfq.edu.ec

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es publicada por USFQ PRESS, casa editorial de la Universidad San Francisco de Quito USFQ y es parte de las siguientes bases, catálogos e índices:

Directorios e índices de revistas académicas / Academic journal directories and indexes



Repositorios regionales y temáticos / Regional and thematic repositories



Motores de búsqueda y grandes bases de datos / Search engines and major databases



Servicios de apoyo a la publicación académica / Academic publishing support services



Plataformas y directorios dedicados a la ciencia abierta y el acceso abierto / Open science and open access platforms and directories



Recursos de archivo



Plataformas



Contenido

Vol. 18, nro. 1 (2026)

Editorial

Editorial

Current Volume: Challenges and Future Perspectives

Volumen actual: Desafíos y perspectivas futuras

Oscar Camacho

Selection of sleeping perches by the Gem Anole, *Anolis gemmosus* O'Shaughnessy 1875, in a cloud forest in Ecuador

Selección de perchas para dormir por el Anolis Gema, *Anolis gemmosus* O'Shaughnessy 1875, en un bosque nublado en Ecuador
Martín Carrera

Producción sostenible de etileno en Ecuador: análisis comparativo entre craqueo de nafta y procesos basados en biomasa de papa andina de descarte

Sustainable ethylene production in Ecuador: comparative analysis between naphtha cracking and biomass-based processes using andean potato waste

Gabriel Vaca-Medrano Sonia Quiroga Quisaguano, Kimberly Rizzo, Dimas Pincay, José Álvarez-Barreto

Generación de combustibles líquidos mediante el proceso de pirólisis a partir de polipropileno y poliestireno para su aprovechamiento energético

Generation of liquid fuels through the pyrolysis process from polypropylene and polystyrene for energy utilization

Bryan S. Montalvo Verduga, Nicole L. Roman Roman, Diana K. Fabara Salazar

Cálculo del desequilibrio en motores de corriente alterna

Unbalance calculation in altering current motors

José Luis Hernández Corona, Jonny Carmona Reyes, Román Daniel Romero Mitre

Efecto del aceite esencial de orégano y ozonización como alternativa para la prolongación del tiempo de vida útil en fréjol cocido. (*Phaseolus vulgaris* L.)

Effect of oregano essential oil and ozonation as an alternative for shelf-life extension in cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.)

Adriana Geovanna Yanchaliquín Yanchaliquín, Renato Agustín Romero Corral

Diseño y evaluación de un sistema basado en Antenas log-periódicas para la detección de la componente electromagnética de rayos cósmicos

Design and evaluation of a detection system for the electromagnetic component of cosmic rays using log-periodic antennas

Henry Sebastián Mayorga Pérez, Alejandro David Amagua Romero, Hugo Oswaldo Moreno Avilés

Design, Analysis and Comparison of Hybrid and Non-Pneumatic Tyres

Diseño, análisis y comparación de neumáticos híbridos y no neumáticos

Shamsher Ali, Syed Aliyar Shah, Moiz Ahmad, Syed Muhammad Zain, Ahsan Rehman Khan

Solución consensuada del mecanismo focal del sismo de M_W 8.8 en Kamchatka y campos de deformación cosísmica resultantes

Consensus solution of the focal mechanism of the M_W 8.8 earthquake in Kamchatka and the resulting seismic deformation fields

Amilcar Carrera-Cevallos

Evaluating the Role of Urban Planning and Proximity Factors in Occupational Disease Transmission in Meat Processing Zones in Aba

Evaluación del papel de la planificación urbana y los factores de proximidad en la transmisión de enfermedades ocupacionales en zonas de procesamiento cárnico en Aba

Francis Ugochukwu Madu, Chinonso Emmanuel Unagha, Gerald Chukwunweike Anozie, Agnes Chinatu Nnamdi, Adaugo Sylvia Chukwukere, Celestine Ogechi Obele

Distribución geográfica del género *Manduca* (Sphingidae) en Ecuador y sus implicaciones agroecológicas

Geographic distribution of *Manduca* moths (Sphingidae) in Ecuador: Agroecological roles and management implications

Michelle Cañizares-Huilca, Diego Guevara, Francisco Piñas

Microfisuramiento de las varillas de refuerzo empleadas en la construcción de viviendas informales: Caso de estudio Riobamba

Microcracking of reinforcing bars used in informal housing construction: Riobamba case study

Evelyn Melisa Cabrera Alvarez, Teresa del Pilar Sáez Paguay, Luisa Paulina Viera Arroba

Inversion of two-flux and four-flux radiative transfer models in WO₃-NiO electrochromic devices

Inversión de los modelos de transferencia radiativa de dos flujos y de cuatro flujos en dispositivos electrocrómicos de WO₃-NiO

David Barrios, Carlos Alvarez, Jose Miquitama, Armando Fabrizio Lopez-Vargas

Current Volume: Challenges and Future Perspectives

Oscar Camacho¹ 

1 Universidad San Francisco de Quito

Autor para correspondencia/Corresponding author: ocamacho@usfq.edu.ec

This new volume of ACI Avances en Ciencias e Ingenierías reflects the diversity and multidisciplinary nature of current research in science and engineering. The twelve articles included in this edition address topics ranging from ecology, renewable energy, and food preservation to seismic analysis, computational modeling, materials science, urban health, and advanced engineering applications. These contributions demonstrate the growing scientific capacity of researchers working on problems of both local and global relevance.

Several studies in this issue focus on challenges related to sustainability and energy, including sustainable ethylene production, fuel generation through pyrolysis processes, and solutions aimed at improving industrial efficiency. Other works explore environmental and biological topics such as species distribution, ecological behavior, and food preservation technologies. In addition, research on seismic deformation, cosmic ray detection systems, electrochromic devices, and advanced engineering design highlights the increasing complexity and interdisciplinary nature of modern scientific research.

For ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, maintaining high editorial standards is fundamental to strengthening its international visibility and impact. During recent months, the journal has advanced in this direction through applications to scientific indexing and visibility systems such as Biblat and Web of Science (WOS), representing an important step in its process of international consolidation.

As part of this editorial strengthening process, an official LaTeX template was also recently incorporated with the aim of facilitating manuscript preparation, improving article standardization, and enhancing the technical presentation of published works.

Likewise, expanding the journal's presence in international databases such as Scopus has become a new strategic goal. Achieving this objective will require continued efforts to strengthen editorial quality, promote international collaboration, and consolidate rigorous and transparent peer-review processes.

Beyond indexes and metrics, these efforts represent an opportunity to strengthen scientific communication in Latin America and create spaces where researchers, students, and academic institutions can actively contribute to global scientific discussions while addressing challenges relevant to their own communities.

In this scenario, universities, researchers, reviewers, and editors share a common responsibility: ensuring that scientific progress continues to be guided by originality, ethical principles, and critical thinking. As science and technology continue to evolve, journals such as ACI Avances en Ciencias e Ingenierías will remain essential platforms for promoting innovative, transparent, and socially relevant scientific research.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /
Received:
12/05/2026

Publicado en línea /
Published online:
15/05/2026

Selection of sleeping perches by the Gem Anole, *Anolis gemmosus* O'Shaughnessy 1875, in a cloud forest in Ecuador

Martín Carrera¹ 

¹Wildlife Conservation Society – Ecuador Program, Quito, Ecuador.

*Author for correspondence: Martín Carrera. martin-d@hotmail.com

Selección de perchas para dormir por el Anolis Gema, *Anolis gemmosus* O'Shaughnessy 1875, en un bosque nublado en Ecuador

Abstract

The selection of sleeping perches plays a critical role in predator avoidance, territorial defense, access to feeding areas, and reaching breeding sites. This behavior has been widely studied across various taxa, including the diverse lizard genus *Anolis*. For *Anolis gemmosus*, however, only one previous study has addressed sleeping perch selection, focusing solely on physical variables of the perches. In this study, we incorporate additional variables—such as the sex and size of the lizards—and assess their effect on perch type and leaf area. Our results reveal a significant relationship between individual size, particularly in males, and perch area. This pattern may reflect strategies for predator avoidance, or territory maintenance, or may simply result from the higher availability of leaves within a specific range of area in the habitat of *A. gemmosus*.

Keywords: Sleep ecology, predator avoidance, Iguanidae, Anolinae, territoriality, habitat use.

Resumen

La selección de perchas para dormir es importante como estrategia para evitar depredadores, defender territorio y acceder a áreas de alimentación y de reproducción. Este tema ha sido estudiado extensamente en diferentes grupos de organismos, incluyendo el diverso grupo de lagartijas del género *Anolis*. Para *Anolis gemmosus* solo existe un estudio acerca de la selección de perchas para dormir, pero solo toma en cuenta las variables físicas de las perchas. En este estudio tomamos en cuenta nuevas variables como sexo y tamaño de las lagartijas, estudiando su efecto en el tipo de percha y el área de la hoja. Nuestros resultados indican que existe una relación significativa entre el tamaño de los individuos, especialmente los machos, con respecto al área de percha. Este patrón podría reflejar a una estrategia para evadir depredadores, mantener territorios, o podría resultar de una mayor disponibilidad de hojas con un rango de área específica en el hábitat de *A. gemmosus*.

Palabras clave: Ecología del sueño, evasión de depredadores, Iguanidae, Anolinae, territorialidad, uso de hábitat.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Elisa Bonaccorso

Recibido /
Received:
05/08/2024

Aceptado /
Accepted:
27/08/2025

Publicado en línea /
Published online:
06/04/2026

INTRODUCTION

All animal species engage in some form of rest or sleep to conserve energy, restore neural functions, and reduce the risk of predation [1, 2]. Research on sleep behavior has examined specific sleep patterns, durations, preferred locations, and general behaviors, which have been reviewed across several animal groups [3, 4, 5]. In lizards, studies have primarily focused on the selection of sleeping perches, considering factors such as perch stability and temperature, predator detection, the relationship between body size and perch height or diameter, and perch orientation relative to the ground [6, 7, 8, 9, 10]. Different lizard species have developed a variety of sleep strategies, mainly to enhance predator avoidance while sleeping, defend their territories, access foraging areas, and reach breeding sites [11, 12, 13, 14].

Among lizards, species from the genus *Anolis* are particularly well-suited for research on sleep ecology because of their ease of detection while sleeping [10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. In general, *Anolis* lizards prefer to sleep on branches, stems, and leaves of ferns, trees, grasses, and shrubs at various levels of the forest strata [1, 10, 12, 15, 25]. The Gem Anole, *Anolis gemmosus* O'Shaughnessy 1875, is a commonly encountered diurnal species found in both primary and secondary rainforests across the western Andes of Ecuador and Colombia, at elevations ranging from 1177 to 2468 m a.s.l. [26]. The abundance of *A. gemmosus* in Ecuador, along with their visibility during sleep, makes it an excellent candidate for investigating lizard sleeping behavior.

While there is information on the sleeping behavior of certain *Anolis* species, only one study has investigated the sleeping habits of *A. gemmosus*. That study focused on perch characteristics such as vertical distribution, the orientation of individuals on the perch, and tail position, aiming to test niche overlap with other *Anolis* species. However, this study did not consider factors such as the sex or size of individuals and was based on a small sample of only nine lizards [27].

The primary objective of this study is to determine whether individual size and sex influence the type and area of leaves selected as sleeping perches of *A. gemmosus*, thereby complementing the findings of the only available study on the species' sleep ecology [27]. I hypothesize that (1) body size (SVL) and sex will influence the perch type or perch area selected [12, 18]. And (2) both sexes will exhibit sleeping site fidelity [14, 16, 18]. This research aims to provide novel insights into the natural history and ecology of this understudied species.

MATERIAL AND METHODS

This study was conducted at Bosque Protector Río Guajalito, a privately-owned nature reserve encompassing 765 ha of cloud forest in the province of Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. The reserve is situated at the 59-kilometer mark on the Quito-Chiriboga-Santo Domingo Road and is co-owned by various entities including Bisocial, Fundación Salvar Tierra, Fundación Jocotoco, Aves y Conservación and private individuals. It spans across the provinces of Pichincha and Santo Domingo de los Tsáchilas, with elevations ranging from 1800 to 2400 m a.s.l. The area is predominantly composed of pristine cloud forest, although human-disturbed landscapes such as cattle-grazing grasslands are present along its borders [28].



Between January 8 and 25, 2021, I conducted nightly surveys from 20:00 to 24:00 h along the primary ecotourism trail inside Bosque Protector Río Guajalito, totaling 68 hours of field observations. This trail passes through forested areas and a few creeks and is not affected by the main road. The elevational range along the trail varies between 1900 and 2000 m a.s.l. (Fig 1). I selected this time frame because all individuals are expected to be asleep, and the absence of human activity minimizes potential disturbances.

While free walking along the trail, I searched for sleeping *A. gemmosus* individuals along the trail's edge, using headlamps for illumination. Upon each encounter, I photographed the sleeping lizard and its perch. I then captured the lizard and measured the snout-vent length (SVL) from the tip of the snout to the cloaca —using a Vinca DCLA-0605 digital caliper with an accuracy of ± 0.03 . To facilitate individual identification and assess the potential for sleeping site fidelity through recaptures on subsequent nights, I marked each lizard on the dorsum with a unique number, using a black non-toxic marker. Sex was determined based on the species' clear sexual dimorphism: adult males display a distinct and colorful dewlap, while adult females possess a grey band across their back and lack a dewlap [26]. Age was not considered in the analysis due to the small sample size of juveniles; only adults were included. For perch measurements, I photographed each leaf used as a sleeping perch. Leaf area was calculated using ImageJ software [29]. Leaf length and width measurements were used as scale references.

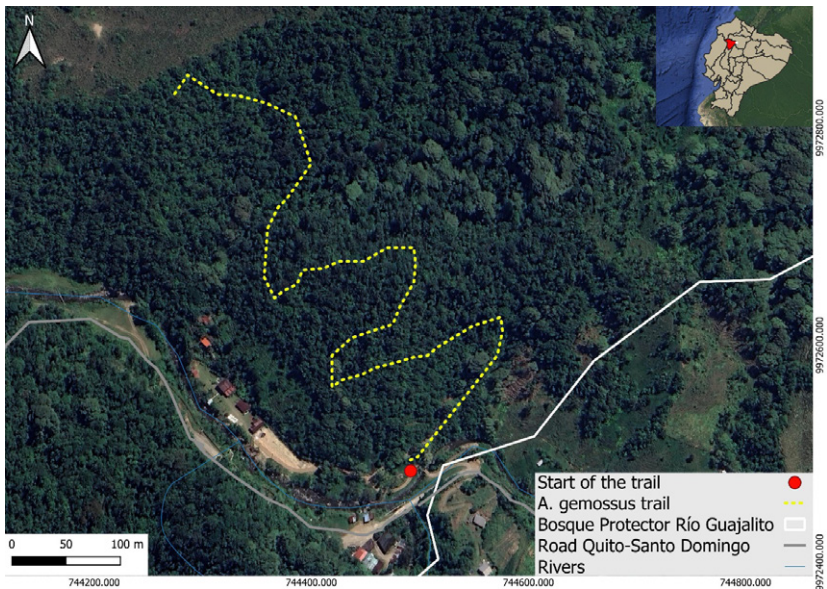


FIGURE 1. Map of the study area showing the Quito-Santo Domingo de los Tsáchilas road to the south, the boundaries of the Bosque Protector Río Guajalito in white, the trailhead marked with a red dot, and the surveyed trail used to search *Anolis gemmosus* indicated by a yellow dotted line.

I categorized the perch types based on the plant species that served as sleeping sites by the lizards. These categories included: (A) perches with long and narrow leaves, typical of most grasses; (B) perches with long and broad leaves, resembling oblong-shaped leaves; (C) perches consisting of compound leaves and small leaflets, such as those found in many fern species; (D) perches with notably large leaves, such as those of *Gunnera* spp.; (E) perches consisting of stems (Fig 2). It is essential to emphasize that this study did not involve the collection of any plant or animal specimens.

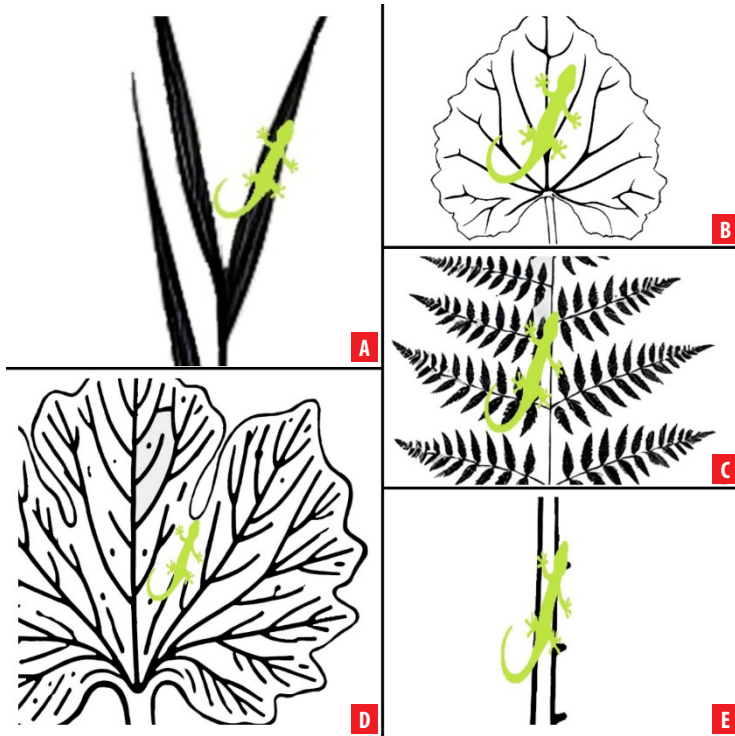


FIGURE 2. Examples of perch types used by *Anolis gemmosus*: **A** Long and narrow leaves (e.g., grasses); **B** long and broad oblong leaves; **C** compound leaves (e.g., ferns); **D** large leaves; and **E** stems.

Given that observed lizards were predominantly resting on leaves (Fig. 3), I proceeded to label and identify each plant on which they were found. To facilitate plant identification, I consulted a field guide detailing the common plant species of Bosque Protector Río Guajalito [30]. However, for plants that lacked flowers, identification was limited to the genus level. Lizards found sleeping on these plants were still included in the analyses.



FIGURE 3. A Adult female of *Anolis gemmosus* (SVL = 55 mm) sleeping on the giant leaf of *Gunnera atropurpurea* (perch type D). **B** Adult male of *Anolis gemmosus* (SVL = 60 mm) sleeping on the leaves of the fern *Thelypteris semilunata* (perch type C). Photographs by Martín Carrera.

First, to test whether lizard body size and sex (explanatory variables) influence the perch type (response variable) used as a perch, I performed a multinomial logistic regression model. The perch type was treated as a factor with five categories (Fig. 2). Posteriorly, I computed odds ratios to interpret the effects of body size and sex on perch type selection, and Wald tests were used to assess statistical significance of model coefficients. Second, to evaluate whether lizard body size and sex (explanatory variables) influence the perch area (response variable), I performed several linear regressions, first without separating by sex, and then separating males and females to explore potential relationships between body size and the perch area separated by sex. All statistical analyses were performed using the default analytical package *Stats* of R Statistical analysis software version 4.1.1 [31].

RESULTS

I encountered a total of 46 lizards (14 males and 32 females), primarily resting on the leaves of 16 different plant species (Table 1). No individuals were recaptured during the entire study. Females were found sleeping mainly on perch types B and C, each accounting for nine females, followed by perch type D for seven females, perch type A for six females, and finally perch type E for one female. In the case of males, six individuals were found in perch type C, followed by perch type D for four males, perch type B for three males, and finally perch type A for one male.

TABLE 1. Plant species used as sleeping perches by *Anolis gemmosus*. The second column shows the perch type: **A** Long and narrow leaves (e.g., grasses); **B** long and broad oblong leaves; **C** compound leaves (e.g., ferns); **D** large leaves; and **E** stems.

Plant species	Perch type	Number of males	Number of females
<i>Acalypha</i> sp.	B	0	2
<i>Blechnum fragile</i> Liebm 1967	C	0	1
<i>Boehmeria caudata</i> Sw 1788	B	0	4
<i>Canna indica</i> L 1753	D	1	0
<i>Cenchrus bambusiformis</i> (E. Fourn.) Morrone 2010	A, E	1	7
<i>Erato polymnioides</i> DC 1836	B	1	1
<i>Gunnera atropurpurea</i> L.E Mora 1978	D	3	5
<i>Heliconia impudica</i> Abalo 1983	D	0	1
<i>Liabum saloyense</i> Domke 1937	B	1	1
<i>Lophosoria quadripinnata</i> (J.F.Gmel.) C. Chr 1920	C	2	4
<i>Macrothelypteris torresiana</i> (Gaudich.) Ching 1963	C	0	1
<i>Monochaetum lineatum</i> Naudin 1845	B	1	0
<i>Piper lenticellosum</i> C. DC 1866	B	0	1
<i>Saurauia prainiana</i> Buscal 1912	B	0	1
<i>Sticherus blepharolepis</i> (Sodirol) Ching 1940	C	3	2
<i>Thelypteris semilunata</i> (Chodat) A. R. SM 1984	C	1	1

The multinomial logistic regression model revealed that body size had a significant effect on the selection of perch type D compared to perch type A (estimate = 0.14, $p = 0.038$), with an odds ratio of 1.15, suggesting that larger individuals were more likely to use perch type D. Sex had no significant effect on leaf type selection in any of the comparisons ($p > 0.35$). These findings indicate that lizard body size, but not sex, influences the selection of perch type D (Fig 4).

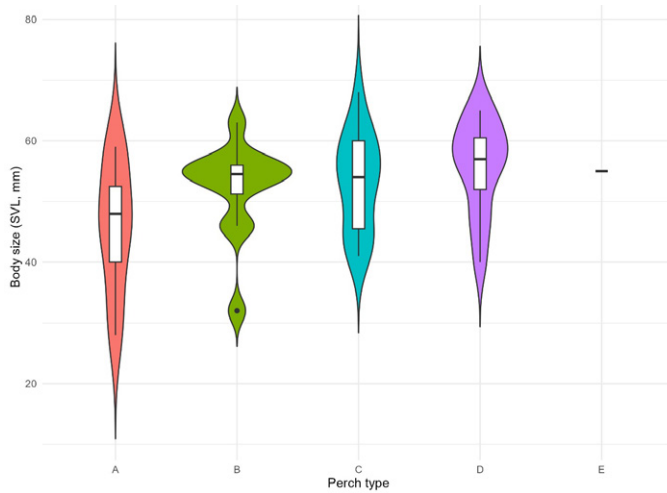


FIGURE 4. Distribution of lizard's body size (SVL) on each perch type selected.

The linear regressions showed that neither body size, sex, nor their interaction had a significant effect on the perch area ($p > 0.2$ for all the variables and interaction). When analysed separately by sex, body size significantly predicted the perch area used by male lizards ($R^2 = 0.30$, $F(1, 12) = 5.13$, $p = 0.043$), with larger individuals selecting larger leaves as perches. In contrast, no significant relationship was found for females ($R^2 = 0.05$, $F(1, 29) = 1.58$, $p = 0.220$). These results suggest that the relationship between body size and perch area may differ between sexes (Fig 5).

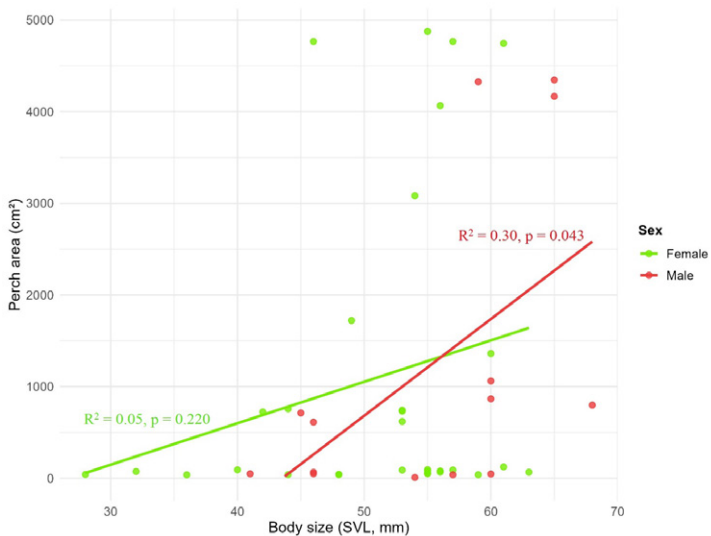


FIGURE 5. Linear regressions between lizard body size (SVL in mm) and perch area (cm²), separated by sex.

DISCUSSION

This study investigated how body size and sex influence perch selection in *A. gemmosus*, focusing on the type and area of leaves used as perches. Both factors play important roles, but their effects differ depending on the aspect of perch use considered. The multinomial logistic regression indicated that lizard body size significantly influenced perch type selection, with larger individuals showing a tendency to perch on type D perches, associated with larger surface areas. However, sex did not emerge as a significant predictor for perch type choice in this model. In contrast, when we consider perch size, the linear regression showed that only in males, perch area increased significantly with body size. This sex-specific pattern suggests that male lizards may be more selective as they grow larger.

Furthermore, selecting specific sleeping perches likely plays a key role in several ecological functions, including antipredator behavior, thermoregulation, and territoriality. For example, choosing sleeping sites in the mid-vegetation strata is a common antipredator strategy in *Anolis* species [13, 14], as movements in leaves and stems can alert lizards to approaching predators, enhancing escape success [10]. In *Anolis gemmosus* at Bosque Protector Río Guajalito, known predators include diurnal snakes such as *Atractus gigas*, *Chironius monticola*, and *Erythrolamprus epinephelus* [28]. Although these snakes are diurnal, nocturnal predators like bats, owls, or nocturnal snakes may still pose a risk [14]. In this context, not only the perch area but also the shape may offer functional advantages. For instance, narrower or more elongated leaves might enhance early predator detection by transmitting vibrations more effectively, or they may allow lizards to position themselves more optimally for a quick escape [14, 27].

Thermoregulation may also influence perch choice. Although studies on nocturnal thermoregulation in *Anolis* lizards are scarce, findings from the highland species *A. heterodermus* show that daytime microhabitat use is influenced by body temperature [32]. Given that lizards may undergo voluntary hypothermia to conserve energy, it is plausible that *A. gemmosus* selects sleeping perches with specific areas that provide an optimal body temperature [10, 16, 33], nevertheless, more research about perch characteristics, such as texture and temperature, is needed. Additionally, territorial behavior could contribute to perch selection patterns, as many *Anolis* species exhibit territory-based spatial use [10, 11, 24, 34]. For instance, in *A. gingivinus*, females reuse sleeping perches within smaller home ranges, while males occupy larger territories and avoid reusing sites [19]. In this study, I did not recapture individuals, preventing comparisons of site fidelity; however, a marked female with an eye injury was observed sleeping in the same area on two non-consecutive nights. While anecdotal, this observation suggests that some individuals may exhibit site fidelity, warranting further investigation.

SUMMARY AND CONCLUSION

Previous studies have suggested that various factors such as individual size, sex, perch type, individual position in the sleeping perch, perch height, and plant species that *Anolis* use to sleep play crucial roles in the selection of sleeping perches [18]. However, this study suggest that both leaf area and perch type might influence the selection, particularly on males. Nevertheless, to gain a deeper understanding of the sleeping perch selection



patterns in *A. gemmosus*, further sampling efforts are required considering other variables such as plant species density, physiological aspects like temperature, perch temperature, predatory avoidance, and territoriality by recaptures to test properly if there is a perch selection based on those criteria. Additionally, given the high abundance of *A. gemmosus* individuals in the Bosque Protector Río Guajalito, it is essential to capture and mark a higher number of individuals to have a larger sample size.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank Vlastimil Zak, manager and co-owner of Bosque Protector Río Guajalito reserve, who helped us identifying several plant species. I thank Cliciani Neira (WCS-Ecuador) for her useful help in during figure preparation. I thank the editors and the reviewers for helping improve the manuscript with useful recommendations.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Martín Carrera conceived this research, developed the experimental design, performed the statistical analysis, wrote the manuscript, and funded this research. Tables and figures were prepared by Martín Carrera with support of Cliciani Neira. Photographic material was provided by Martín Carrera.

CONFLICTS OF INTEREST

The author reports no conflict of interest in the entire process of this study.

DECLARATION OF GENERATIVE AND AI-ASSISTED TECHNOLOGIES IN THE WRITING PROCESS

For this work, the author used ChatGpt in order to adapt an existing ggplot2 script to create the violinplots and scatterplots of the paper.

Afterwards, the author reviewed and edited the content as deemed necessary and take full responsibility for the final version and the published content.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

All the data is presented in the paper. Nevertheless, data are available upon reasonable request to the corresponding author (in exceptional cases).

REFERENCES

- [1] Mohanty, N. P., Harikrishnan, S., and Vasudevan, K. (2016). Watch out where you sleep: nocturnal sleeping behaviour of Bay Island lizards. *PeerJ*, 4, e1856. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1798v1>
- [2] Shein-Idelson, M., Ondracek, J. M., Liaw, H. P., Reiter, S., and Laurent, G. (2016). Slow waves, sharp waves, ripples, and REM in sleeping dragons. *Science*, 352(6285), 590-5. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3621>
- [3] Campbell, S., and Tobler, I. (1984). Animal sleep: a review of sleep duration across phylogeny. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 8, 269-300. [https://doi.org/10.1016/0149-7634\(84\)90054-x](https://doi.org/10.1016/0149-7634(84)90054-x)
- [4] Fei, H., de Guinea, M., Yang, L., Chapman, C. A., and Fan, P. (2022). Where to sleep next? Evidence for spatial memory associated with sleeping sites in Skywalker gibbons (*Hoolock tianxing*). *Animal Cognition*, 25(4), 891-903. <https://doi.org/10.1007/s10071-022-01600-0>
- [5] Langford, F. M., and Cockram, M. S. (2010). Is sleep in animals affected by prior waking experiences?. *Animal Welfare*, 19(3), 215-222. <https://doi.org/10.1017/S0962728600001597>
- [6] Reaney, L.T., and Whiting, M.J. (2003). Picking a tree: habitat use by the tree agama, *Acanthocercus atricollis atricollis*, in South Africa. *African Zoology*, 38, 273-278. <https://doi.org/10.1080/15627020.2003.11407281>
- [7] Sabo, J.L. (2003). Hot rocks or no hot rocks: overnight retreat availability and selection by a diurnal lizard. *Oecologia*, 136, 329-335. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1292-6>
- [8] Ikeuchi, I., M. Hasegawa., and Mori, A. (2012). Characteristics of sleeping sites and timing of departure from them in a Madagascan diurnal gecko, *Lygodactylus tolampyae*. *Current Herpetology*, 31, 107-116. <https://doi.org/10.5358/hsj.31.107>
- [9] Razafimahatratra, B., Mori, A., and Hasegawa, M. (2008). Sleeping site pattern and sleeping behavior of *Brookesia decaryi* (Chamaeleonidae) in Ampijoroa dry forest, northwestern Madagascar. *Current Herpetology*, 27, 93-99. <https://doi.org/10.3105/1881-1019-27.2.93>
- [10] Cabrera-Guzmán, E., and Reynoso, V.H. (2010). Use of sleeping perches by the lizard *Anolis uniformis* (Squamata: Polychrotidae) in the fragmented tropical rainforest at Los Tuxtlas, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 921-924. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2010.003.662>
- [11] Poche, A.J., R. Powell., and Henderson, R.W. (2005). Sleep-site selection and fidelity in Grenadian Anoles. *Herpetozoa*, 30, 3-10.
- [12] Singhal, S., and Johnson, M. (2007). The behavioral ecology of sleep: natural sleeping site choice in three *Anolis* lizard species. *Behaviour*, 144, 1033-1052. <https://doi.org/10.1163/156853907781871860>
- [13] Acerbi, A., and Nunn, C.L. (2011). Predation and the phasing of sleep: an evolutionary individual-based model. *Animal Behaviour*, 81, 801-811. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.01.015>
- [14] Kaiser, C.M., and Kaiser, H. (2021). Coming home to roost: comments on individual sleep-site fidelity, sleep-site choice, and sleeping positions in *Anolis* (*Norops*) *leditzigorum* (Köhler et al., 2014) in Costa Rica (Squamata: Dactyloidae). *Herpetological journal*, 14, 375-378.
- [15] Gorman, G.C. (1980). *Anolis occultus*, a small cryptic canopy lizard: Are there pair bonds. *Caribbean Journal of Science*, 15, 29-31.
- [16] Kattan, G. (1984). Sleeping perch selection in the lizard *Anolis ventrimaculatus*. *Biotropica*, 16, 328-329. <https://doi.org/10.2307/2387945>
- [17] Goto, M.M., and Osborne, M.A. (1989). Nocturnal microhabitats of two Puerto Rican grass lizards, *Anolis pulchellus* and *Anolis krugi*. *Journal of Herpetology*, 23, 79-81. <https://doi.org/10.2307/1564322>
- [18] Clark, D.L., and Gillingham, J.C. (1990). Sleep-site fidelity in two Puerto Rican lizards. *Animal Behaviour*, 39, 1138-1148. [https://doi.org/10.1016/s0003-3472\(05\)80786-9](https://doi.org/10.1016/s0003-3472(05)80786-9)
- [19] Shew, J.J., Larimer, S.C., Powell, R., and Parmerlee, J.S. (2002). Sleeping patterns and sleep-site fidelity of the lizard *Anolis gingivinus* on Anguilla. *Caribbean Journal of Science*, 38, 136-138.



- [20] Vitt, L.J., Cristina, T., Avila-Pires, S., Zani, P.A., and Espósito, M.C. (2002). Life in shade: The ecology of *Anolis trachyderma* (Squamata: Polychrotidae) in Amazonian Ecuador and Brazil, with comparisons to ecologically similar anoles. *Copeia*, 2, 275-286. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2002\)002\[0275:listeo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2002)002[0275:listeo]2.0.co;2)
- [21] Vitt, L.J., Avila-Pires, S., Espósito, M.C., Sartorius, S.S., and Zani, P.A. (2003a). Sharing Amazonian rain-forest trees: ecology of *Anolis punctatus* and *Anolis transversalis* (Squamata: Polychrotidae). *Journal of Herpetology*, 37, 276-285. [https://doi.org/10.1670/0022-1511\(2003\)037\[0276:sarteo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1670/0022-1511(2003)037[0276:sarteo]2.0.co;2)
- [22] Vitt, L.J., Avila-Pires, S., Zani, P.A., Sartorius, S.S., and Espósito, M.C. (2003b). Life above ground: ecology of *Anolis fuscauratus* in the Amazon rain forest, and comparisons with its nearest relatives. *Canadian Journal of Zoology*, 81, 142-156. <https://doi.org/10.1139/z02-230>
- [23] Molina-Zuluaga, C., and Gutiérrez-Cárdenas, D.A. (2007). Uso nocturno de perchas en dos especies de *Anolis* (Squamata: Polychrotidae) en un bosque Andino de Colombia. *Papéis Avulsos de Zoología*, 47, 273-281. <https://doi.org/10.1590/s0031-10492007002200001>
- [24] Traverzo-Pérez, F.J. (2008). Hábitat estructural nocturno y fidelidad al dormitorio en *Anolis cristatellus* y *Anolis krugi*. M.Sc. Thesis, Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico. 75 p.
- [25] Losos, J. B. (2009). Lizards in an Evolutionary Tree: Ecology and Adaptive Radiation of Anoles (1st ed.). University of California Press, London, England.
- [26] Ayala-Varela, F., and Carvajal-Campos, A. (2019). *Anolis gemmosus* In: Torres-Carvajal, O., Pazmiño-Otamendi, G., and Salazar-Valenzuela, D., Reptiles del Ecuador. PUCE (Ed.). Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- [27] Ramírez-Jaramillo, S.R. (2018). Microhábitats nocturnos en dos especies de *Anolis* (Iguania: Dactyloidae) al noroccidente de Pichincha, Ecuador. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 8, 7-13.
- [28] Yáñez-Muñoz, M.H., and Morales-Mite, M.A. (2013). Bosque Protector Río Guajalito: La selva subtropical en las laderas occidentales de los Andes. Pp. 129-143 In HERPETOFAUNA EN ÁREAS PRIORITARIAS PARA LA CONSERVACIÓN: El sistema de Reservas Jocotoco y Ecominga. (Ed.). Monografía 6: 1-392. Serie de Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN), Fundación para la Conservación Jocotoco, Fundación Ecominga. Quito-Ecuador.
- [29] Schneider, C. A., Rasband, W. S., and Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- [30] Jaramillo, J., and Grijalva, E. (2010). Flora del bosque nublado de Río Guajalito. Herbario QCA de la Escuela de Biología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- [31] R Development Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. RFoundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- [32] Méndez-Galeano, M., and Calderon-Espinosa, M. (2017). Thermoregulation in the Andean lizard *Anolis heterodermus* (Squamata: Dactyloidae) at high elevation in the Eastern Cordillera of Colombia. *Iheringia. Série Zoologia*, 107, e2017018. <https://doi.org/10.1590/1678-4766e2017018>
- [33] Christian, K.A., C.R. Tracy., Porter, W.P. 1984. Physiological and ecological consequences of sleeping-site selection by the Galapagos land iguana (*Conolophus pallidus*). *Ecology*, 65, 752-758.
- [34] Kamath, A., and Losos, L. (2017). The erratic and contingent progression of research on territoriality: a case study. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 71, 89-94. <https://doi.org/10.1007/s00265-017-2319-z>

Producción sostenible de etileno en Ecuador: análisis comparativo entre craqueo de nafta y procesos basados en biomasa de papa andina de descarte

Gabriel Vaca-Medrano¹, Sonia Quiroga Quisaguano¹, Kimberly Rizzo^{1,2}, Dimas Pincay^{1,2}, José Álvarez-Barreto^{1*}

¹Departamento de Ingeniería Química, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador.

²Universidad Ecotec, Km. 13.5 Samborondón, Samborondón, EC092302, Ecuador.

³Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería, Universidad Santiago de Compostela, Campus Vida, 15705 Santiago de Compostela, España.

*Autor correspondiente/Corresponding author; email: jalvarezb@usfq.edu.ec

Sustainable ethylene production in Ecuador: comparative analysis between naphtha cracking and biomass-based processes using andean potato waste

Resumen

Ecuador, un país altamente dependiente de su industria petrolera, enfrenta la necesidad de importar derivados del petróleo debido a la falta de un sector petroquímico desarrollado. En este estudio se evalúa comparativamente la viabilidad técnica, económica y ambiental de tres rutas para la producción de etileno, con un enfoque hacia procesos más sostenibles y amigables con el ambiente. La primera, el proceso lineal tradicional basado en el craqueo térmico de nafta, destaca por su madurez tecnológica y menores costos iniciales, pero se basa en la secuencia de “extraer, producir, desechar”, lo que genera un alto impacto ambiental debido a la gran cantidad de energía requerida y las significativas emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, las dos rutas circulares propuestas utilizan residuos agrícolas de papa como biomasa para la producción de etileno: (a) fermentación de biomasa para obtener bioetanol seguido de una deshidratación catalítica y (b) digestión anaeróbica de biomasa para obtener metano seguido de un proceso de electrocatálisis y deshidratación catalítica de etanol. Los resultados del estudio indican que, a pesar de que estas rutas enfrentan desafíos técnicos y económicos, como bajos rendimientos, más implementación de equipos para tratamiento de materia prima y mayores costos iniciales, ofrecen beneficios ambientales alineados con los principios de la química verde, tales como la reducción de emisiones de carbono, el uso de materias primas renovables y una mayor eficiencia energética. De los dos procesos circulares analizados, la fermentación se considera la opción más aplicable debido a la disponibilidad de biomasa y la madurez del proceso en la industria local, a pesar de tener un costo 2.6 veces mayor que el proceso lineal. Si bien la producción de etileno a partir de nafta sigue siendo la opción más viable en términos económicos y tecnológicos, el desarrollo de una industria de bioetileno sostenible sigue teniendo desafíos de escalabilidad, rendimientos y altos costos iniciales, pero permitiría valorizar los residuos agrícolas, diversificando la matriz productiva del país y posicionando a Ecuador como un referente en innovación verde en América Latina.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
19/12/2024

Aceptado /
Accepted:
04/05/2025

Publicado en línea /
Published online:
09/02/2026



Palabras claves: bioetileno, biomasa, deshidratación catalítica, electrocatalisis, papa, valoración de residuos.

Abstract

Ecuador, a country highly dependent on its oil industry, faces the need to import petroleum derivatives due to the lack of a developed petrochemical sector. In this study, the technical, economic, and environmental feasibility of three routes for ethylene production is comparatively evaluated, with a focus on more sustainable and environmentally friendly processes. The first route, the traditional linear process based on the thermal cracking of naphtha, stands out for its technological maturity and lower initial costs, but it is based on the “extract, produce, dispose” sequence, which generates a high environmental impact due to the large amount of energy required and significant greenhouse gas emissions. On the other hand, the two proposed circular routes use potato agricultural waste as biomass for ethylene production: (a) biomass fermentation to obtain bioethanol followed by catalytic dehydration, and (b) anaerobic digestion of biomass to obtain methane followed by an electrocatalysis process and catalytic dehydration of ethanol. The results of the study indicate that, although these routes face technical and economic challenges, such as low yields, more equipment implementation for raw material treatment, and higher initial costs, they offer environmental benefits aligned with the principles of green chemistry, such as the reduction of carbon emissions, the use of renewable raw materials, and greater energy efficiency. Among the two circular processes analyzed, fermentation is considered the most applicable option due to the availability of biomass and the maturity of the process in the local industry, despite having a cost 2.6 times higher than the linear process. Although ethylene production from naphtha remains the most viable option in economic and technological terms, the development of a sustainable bio-ethylene industry still faces challenges related to scalability, yields, and high initial costs. However, it would allow the valorization of agricultural waste, diversifying the country’s production matrix and positioning Ecuador as a reference in green innovation in Latin America.

Keywords: bio-ethylene, biomass, catalytic dehydration, electrocatalysis, potato, waste valorization.

INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 70, Ecuador se convirtió en un actor importante dentro de la industria petrolera a nivel latinoamericano [1, 2] y, en consecuencia, la extracción de crudo pasó a ser una de las principales actividades económicas del país. De hecho, la relevancia de la industria extractiva nacional sigue siendo importante y es así como, por venta de crudo, el país obtuvo ingresos de más de diez mil millones de dólares en el 2022 [3]. Sin embargo, y a pesar de que Ecuador es considerado un país petrolero, nunca desarrolló su industria petroquímica, por lo que todavía se ve en la necesidad de importar químicos, intermediarios y combustibles de mayor valor agregado que el crudo sin refinar para suplir la demanda interna y así cubrir las necesidades de la población [4, 5].



En este contexto, uno de los principales productos relativos al refinamiento del petróleo es el etileno (C_2H_4) [6, 7], que es la más simple de las olefinas. Se trata de un gas inflamable a temperatura ambiente, incoloro, no corrosivo, no tóxico, ligeramente soluble en agua y soluble en la mayoría de los solventes orgánicos. Su importancia se debe a su estructura molecular, es decir, a su doble enlace carbono-carbono. Este enlace π es responsable de su reactividad química, y además, debido a su alta densidad electrónica, es susceptible a ataques de electrófilos. El etileno también es un agente alquilante activo, que puede usarse para la producción de monómeros importantes, como el etilbenceno, que se deshidrogena a estireno [8]. Además, el etileno es un compuesto orgánico crucial en la industria petroquímica, pues es utilizado principalmente en la producción de plásticos como el polietileno, diversos polímeros, fibras, resinas y materiales de empaque [8].

A pesar de existir una gran variedad de rutas para producir etileno a escala industrial, por ejemplo, pirólisis catalítico, deshidrogenación del etano, acoplamiento oxidativo de metano, entre otras; industrialmente, la ruta más utilizada es el craqueo térmico de hidrocarburos, y entre ellos la nafta [9, 10].

El mercado interno del etileno en el Ecuador no es relevante, pues, por ejemplo, en el 2023, de acuerdo con el Observatorio de la Complejidad Económica, el país solamente importó esta sustancia por un costo de 622 mil dólares. No obstante, la demanda de los derivados de etileno sí tiene relevancia. Es así como en el mismo año, se importaron 235 millones de dólares en polímeros de etileno en formas primarias [11]. Esta diferencia significativa demuestra la inexistencia de una industria de transformación de materias primas en Ecuador, sin esto significar que la demanda de productos derivados del petróleo sea igual de irrelevante. Por lo tanto, iniciar una industria petroquímica en el país podría contribuir de manera positiva a la economía local y también posicionar mejor al Ecuador dentro del mercado latinoamericano.

No obstante, el uso de hidrocarburos para la producción de intermediarios químicos como el etileno tiene repercusiones ambientales importantes, pues la industria química y petroquímica contribuyen en gran medida al cambio climático. De hecho, este tipo de industrias contribuye con alrededor del 18 % de las emisiones industriales directas de CO_2 a nivel mundial [12]. Por esta razón, existen esfuerzos globales para buscar nuevas rutas productivas que permitan obtener los mismos precursores e intermediarios químicos de forma más sostenible y, dado que Ecuador no tiene un sector industrial de transformación desarrollado, iniciar su industria química desde una perspectiva sostenible puede ser una oportunidad que amerita un análisis más profundo.

Entre estas nuevas alternativas de producción sostenible se han considerado potencialmente viables aquellas que utilizan biomasa lignocelulósica y no lignocelulósica en vez de hidrocarburos como materia prima [13, 14]. Al utilizar biomasa, el CO_2 emitido tanto por degradación como por transformación, no contribuye al cambio climático ya que forma parte del ciclo del carbono, a diferencia de los combustibles fósiles. En este contexto, se ha demostrado que es posible obtener etileno a través de la deshidratación catalítica de etanol [15, 16]. A su vez, una ruta viable para la obtención de bioetanol es a través de la degradación de azúcares provenientes de residuos agrícolas [17, 18, 19]. Obtener bioetanol como producto intermedio para la producción de etileno de forma eficiente representa todavía un



reto debido a los bajos rendimientos de fermentación o digestión, y a la necesidad de pretratamientos tanto físicos como químicos que en última instancia complejizan los procesos productivos e incrementan los costos.

Dado el caso, el presente estudio tiene por objetivo presentar un análisis comparativo de tres rutas de producción de etileno en Ecuador. Dos a partir de bioetanol como intermediario químico, y una a partir del craqueo de nafta, en términos de viabilidad técnica, económica y de sostenibilidad ambiental del proceso, considerando sus posibles implicaciones a nivel nacional y regional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima: Craqueo térmico de nafta

El etileno puede sintetizarse a partir de diversas materias primas, entre las cuales se incluyen principalmente nafta y etano [20]. La nafta es una fracción derivada del petróleo y representa aproximadamente entre el 15 % y el 30 % del peso total del crudo [21]. Además de hidrocarburos, esta fracción puede contener azufre, nitrógeno, vanadio, níquel y sodio [22]. En este estudio, se ha considerado la posible utilización de la nafta producida en la refinería de Shushufindi como base de modelado, la cual, según datos estadísticos de EP Petroecuador, registró una producción promedio anual de 884 096 barriles en los últimos cuatro años [23], lo que respalda la viabilidad de obtener esta materia prima en el mercado ecuatoriano.

Proceso productivo

La producción de etileno comienza con el ingreso de la nafta y el vapor de agua al horno de craqueo que opera entre 750 – 800 °C. El gas de craqueo pasa a la fase de enfriamiento y recuperación de energía para luego dirigirse a un compresor y posteriormente a una segunda fase de refrigeración. Paso seguido, los gases de craqueo son enviados a un fraccionador. En este punto, se obtienen diferentes subproductos como el hidrógeno y el metano que se asume que son reutilizados en el proceso de combustión; así como etileno que atravesará una última etapa de compresión y envasado.

Circularidad

La metodología desarrollada en este estudio se enfocó en el diseño preliminar de dos rutas sostenibles para la producción de etileno a escala industrial, priorizando la viabilidad técnica y económica, además de la sostenibilidad ambiental. En este contexto, se detallan los criterios y procedimientos utilizados para el diseño.

En primer lugar, se analizó el impacto ambiental y energético de los métodos convencionales de producción de etileno, especialmente el método basado en craqueo térmico de la nafta. Esto incluyó la evaluación de sus principales desventajas, como el uso de recursos no renovables, el consumo energético elevado y la generación de subproductos contaminantes.



Posteriormente, con base en estudios previos se establecieron criterios clave para el diseño de rutas sostenibles, incluyendo:

- Uso eficiente de recursos renovables [24].
- Minimización de residuos sólidos, líquidos y gaseosos [25].
- Recirculación de insumos y subproductos dentro del proceso [26].
- Reducción en el consumo energético y uso de energías limpias [27].

De esta forma se definieron dos rutas verdes basadas en la producción de bioetanol para su posterior transformación en etileno. La primera utiliza un proceso convencional de fermentación alcohólica mientras que la segunda consiste en una conversión catalítica de biometano a etanol. Ambas rutas fueron evaluadas para incluir estrategias de recirculación de insumos y subproductos, asegurando un ciclo cerrado de materiales en la medida de lo posible.

Procesos circulares

Descripción del proceso productivo y selección de materia prima

En este estudio de modelado, se evaluaron dos procesos que utilizaron residuos agrícolas como materia prima para la producción de etileno empleando etanol como intermediario. El primer proceso se basó en la obtención de etanol mediante fermentación alcohólica de residuos agrícolas, mientras que el segundo se basó en un proceso de digestión anaeróbica del mismo tipo de residuo agrícola seguido de una conversión catalítica. Posteriormente, el etanol generado en ambas vías se transformó en etileno mediante deshidratación catalítica [28]. Por lo tanto, la principal diferencia entre los procesos residió en las rutas propuestas para la producción de bioetanol.

Biomasa como materia prima

Este análisis fue realizado exclusivamente mediante revisión de literatura científica. Se priorizaron estudios realizados en Ecuador o regiones con condiciones climáticas similares. Los valores reportados en la literatura se utilizaron para definir parámetros clave de la biomasa, como contenido de humedad, almidón, fibras y cenizas. Estos datos sirvieron de base para modelar los procesos de conversión bioquímica.

En cuanto a los criterios de selección, los parámetros más relevantes incluyeron:

- Alta disponibilidad en el contexto local.
- Composición adecuada para la conversión en etanol.
- Impacto ambiental y social positivo al valorizar un residuo agrícola.



Generación de las simulaciones

Se evaluó el modelo convencional de producción de etileno mediante el craqueo térmico de nafta, identificando los principales aspectos susceptibles de mejora en términos de circularidad del proceso. A partir de este análisis, se propuso sustituir la materia prima basada en hidrocarburos por biomasa de descarte, desarrollando así dos modelos alternativos de producción. Para el diseño de ambos procesos, se realizaron simulaciones utilizando el software Aspen Plus V14, incluyendo cálculos de parámetros termodinámicos y balances de masa y energía, basados en datos extraídos de la literatura científica sobre condiciones operativas y rendimientos. Este enfoque permitió una comparación integral de las alternativas propuestas frente al modelo convencional, considerando criterios técnicos, económicos y ambientales.

Asimismo, los supuestos para generar el modelo fueron los siguientes:

- Estado estacionario.
- Aunque la conversión de almidón y glucosa no es del 100 %, los intermediarios se consideraron insignificantes.

Craqueo térmico de nafta

En este caso, se utilizaron los datos reportados por Silva y colaboradores en cuanto a composición de la nafta [22]. Con base en este artículo se eligieron las moléculas más representativas: pentano, hexano, heptano y benceno. Luego, se modelaron las reacciones de craqueo de forma que los resultados de la simulación sean similares a los reportados por Seifzadeh y colaboradores para validar los porcentajes de conversión [29]. Adicionalmente, las etapas de separación fueron modeladas con base en el estudio de Meindersma [30].

Fermentación de biomasa

A pesar de no haber modelado la etapa de molienda, para este proceso se consideró un molino de martillos para la reducción del tamaño de partícula de la papa de descarte. Además, el proceso propuesto cuenta con una etapa de pretratamiento que involucra la hidrólisis ácida del almidón de papa, proceso destinado a romper la matriz sólida del tubérculo y liberar los azúcares disponibles. Posteriormente, se buscaron datos de la literatura, con especial énfasis en la tasa de conversión de almidón a glucosa y de glucosa a etanol, por lo que se decidió tomar como base los resultados reportados por Chuquin y Davis. [31, 32]. Además, para la transformación de etanol a etileno se tomó en cuenta las reacciones tanto principales como intermedias de acuerdo con lo indicado en el artículo de Mohsenzadeh et al. [33].

Digestión de biomasa

Para este proceso se tomó como base la tasa de metanización de los residuos de papa reportados por Parawira et al. [34]. Para el enriquecimiento del metano, producto de la digestión anaerobia, se consideró una torre de adsorción. Debido a la estabilidad de



la molécula de metano, su conversión a etanol no es una reacción espontánea. Por lo tanto, para el modelo se evaluó la conversión electrocatalítica de metano a alcoholes de cadena corta en condiciones de presión y temperatura ambiente, mediante un catalizador Cu-Ni@NiO₂ debido a su alto rendimiento [35]. Los productos de la reacción electrocatalítica son metanol y etanol, por lo que una etapa adicional de separación fue necesaria.

*Datos adicionales sobre las bases de diseño pueden ser encontradas en el material suplementario.

Estimación de costos

Con el fin de realizar una primera aproximación a los costos de construcción e instalación de las plantas de producción de etileno que se estudian en este artículo, se utilizaron los balances de materia de cada proceso para dimensionar los equipos en función del caudal másico o volumétrico en cada operación unitaria. Con base en los resultados obtenidos, se buscó información de los precios de los equipos necesarios. Después, se aplicó una tasa de nacionalización del 40 % a cada equipo con el fin de estimar los aranceles de importación y, finalmente, se aplicó el factor de Hand correspondiente para calcular los costos internos de la planta (ISBL). Posteriormente, se calcularon los costos externos de la planta (OSBL), los costos de ingeniería y contingencia como factores de los ISBL y OSBL, así como los costos de operación y costos variables por compra de materias primas [36].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa

Para la selección de la biomasa, se optó por utilizar papa de descarte (*Solanum tuberosum*) producida en Ecuador. Este material fue elegido debido a su abundancia, bajo costo y alto contenido de almidón, características que lo convierten en un recurso viable para la obtención de etanol. De hecho, la papa es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, con una producción estimada de 388 millones de toneladas en 2017, liderada por Asia con más del 50.4 % del total mundial y seguida por Europa (31.5 %), América (11.4 %), África (6.4 %) y Oceanía (0.6 %) [37]. Por otro lado, en el año 2017, en el Ecuador se produjeron 377 mil toneladas de papa, principalmente en el norte y centro de la región interandina, siendo la provincia del Carchi la mayor productora con el 36.14 % de la masa [38].

Tratándose de un producto perecedero, si no se maneja adecuadamente en su cosecha, manipulación y transporte, la papa se deteriora rápidamente y deja de ser apta para el consumo humano. Como consecuencia, las pérdidas generalmente llegan a un 25 % del valor de la cosecha. Esto significa que la cuarta parte de lo que se produce en el campo no llega al consumidor [39]. No obstante, otros estudios indican que en Ecuador el porcentaje de papa de desecho es inferior, alcanzando solamente el ~13 % de la producción [31, 39, 40].



La “papa de rechazo”, es la porción de papa cultivada que no se puede comercializar en las ciudades del país por los siguientes motivos: el tamaño del producto es muy pequeño para su venta, errores en la cosecha que provocaron cortes o irregularidades en el producto, o el producto creció con deformidades o cavidades [39].

Actualmente, la papa de desecho se utiliza como alimento para animales, abono para los terrenos o para el consumo propio de agricultores; sin embargo, esta podría tener un uso potencial como una materia prima para la elaboración de bioetanol y, en consecuencia, de bioetileno.

Ahora bien, en cuanto a composición de la papa, esta puede contener entre un 69.4 y un 72.3 % de almidones y más de un 88 % en carbohidratos totales, lo que supondría entre un 5.4 y un 10 % de proteínas [40]. Es decir, debido a su alto contenido de azúcares, resulta ser un sustrato adecuado tanto para ser sometido a procesos de fermentación anaeróbica con el objetivo de producir metano, como a procesos de fermentación alcohólica con el fin de obtener etanol.

Diseño de las plantas

Las bases del diseño del proceso para la producción de etileno se muestran en la Tabla 1. Se estandarizó el flujo másico de materia prima en función de la disponibilidad de papas de descarte disponibles en la provincia del Carchi, Ecuador. Es decir, se asumió una producción de papa anual en Ecuador de 377 mil toneladas, de las cuales cerca del 36 % son producidas en la provincia del Carchi, y de ese porcentaje, aproximadamente el 18.9 % corresponde a la fracción descartada (porcentaje que a su vez representa el promedio de la producción descartada en el país según la literatura) [31, 38, 39]. Además, se asume que todas las plantas propuestas operan durante 24 horas, 350 días al año (asumiendo 15 días de detención de la planta por actividades de mantenimiento). De esta manera, tanto el flujo másico de nafta como de biomasa fueron de 3.067 t/h y el rendimiento del producto principal fue comparable.

Tabla 1. Resumen de las bases de diseño.

Base de diseño	Producción lineal	Producción circular	
	Craqueo térmico de nafta	Proceso Circular 1: Fermentación de biomasa	Proceso Circular 1: Digestión de biomasa
Ubicación	Shushufindi-Sucumbíos u otra zona petrolera con disponibilidad de la materia prima.	Carchi: Provincia que concentra la mayor producción de papa en el país con 38 % del total nacional [38, 39].	
Materia prima	Nafta: Producción: 884 096 barriles, promedio anual en los últimos 4 años.	Residuos agrícolas: papa Composición general: • 20 % de materia seca, • 60-80 % es almidón (70 -80 % es amilopectina). [40].	



Base de diseño	Producción lineal	Producción circular
Especificaciones del producto	Etileno Fórmula química: • C_2H_4 • Gas incoloro • Corazón de la planta: horno de craqueo • Combustión 800°C • Baja solubilidad en agua • Pureza: alta • Altamente inflamable • Temperatura de autoinflamación: 450 °C • Presentación final: Tanques de 50 o 200 litros	Bioetileno • Alternativa más sostenible • C_2H_4 • Gas incoloro • Baja solubilidad • La biomasa requiere pretratamiento • Baja solubilidad en agua • Altamente inflamable • Presentación final: Tanques de 50 o 200 litros
Caudal del producto	• Necesita enfriamiento a 50 °C • Corazón de la planta: fermentación Flujo másico: 3.067 t/h (nafta y biomasa) Consideraciones: 24 horas de operación 350 días de funcionamiento	

Craqueo térmico de nafta

En la Figura 1 se muestra el diagrama de la producción de etileno mediante craqueo térmico de nafta.

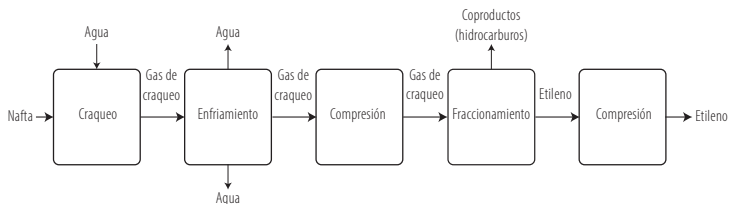


Figura 1. Diagrama de flujo simplificado de la planta de producción de etileno por craqueo térmico de nafta.

El diagrama de flujo del modelo de la planta que funciona por craqueo de nafta se muestra en la Figura 2.

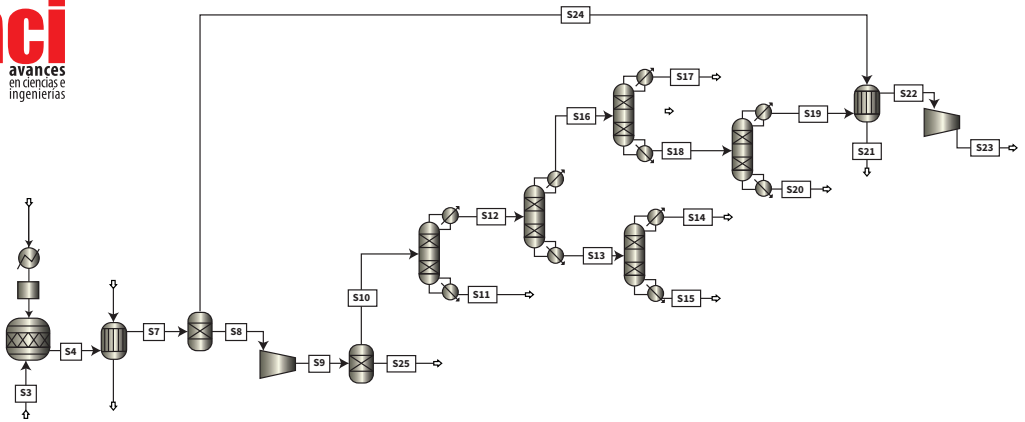


Figura 2. Diagrama de flujo de la planta de producción de etileno por craqueo térmico de nafta considerando una entrada de materia prima (nafta) de 3.067 t/h.

Las condiciones de operación y conversiones por reacción del horno de craqueo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de los parámetros de operación y rendimiento utilizados para el modelaje del horno de craqueo.

Nomenclatura en la simulación	Tipo de equipo	Condiciones de operación	Unidades	Conversión fraccional	Conversión fraccional del componente	Estequiometría
B1	Horno de craqueo	1000	°C	0.98	Heptano	$2 C_7H_{16} \rightarrow 3 C_2H_4 + 2 C_3H_6 + 2 CH_4$
				0.99	Pentano	$C_5H_{12} \rightarrow C_2H_4 + C_3H_8$
				0.99	Hexano	$C_6H_{14} \rightarrow C_3H_6 + C_3H_8$
				0.45	Propano	$C_3H_8 + H_2O \rightarrow C_2H_4 + 3 H_2 + CO$
				0.99	Propano	$C_3H_8 \rightarrow CH_4 + C_2H_4$
		1	bar	0.9	Hidrógeno	$CO + 3 H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$
				0.25	Etileno	$2 C_2H_4 \rightarrow C_4H_{10}$
				0.5	Butano	$C_4H_{10} \rightarrow C_4H_6 + H_2$
				0.15	Monóxido de Carbono	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
				0.07	Etileno	$C_2H_4 + H_2 \rightarrow C_2H_6$

Dado que la nafta es una mezcla de diversos hidrocarburos, se decidió modelar las reacciones de craqueo tomando como referencia su composición típica [22] y las reacciones estequiométricas asociadas. En el diagrama de proceso, la corriente S1 representa la alimentación de nafta al horno de craqueo, donde únicamente se eleva su temperatura sin modificar su composición, dando lugar a la corriente S2 a la



salida del calentador. La corriente S3 corresponde al caudal másico de vapor. Por su parte, S4 identifica la mezcla de hidrocarburos obtenida tras el craqueo; esta mezcla se enfría en un intercambiador, generando las corrientes S5 y S6, ambas de agua, mientras que S7 mantiene la misma composición que S4. El caudal másico S7 ingresa a un separador que remueve el agua que será posteriormente utilizada y se representa como S24, mientras que S8 es la corriente de hidrocarburos que ingresa a una etapa de compresión (S9) y posteriormente a una etapa de separación. La corriente S25 está compuesta únicamente por sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, los cuales se consideran los componentes principales del “gas agrio” [41], mientras que la corriente S10 está compuesta por los gases de craqueo que a su vez atraviesan una etapa posterior de separación. El caudal másico S11 corresponde entonces a los hidrocarburos más pesados C5-C7 y el S12 a una fracción más ligera que a su vez atraviesa un proceso adicional de separación. En S13 se separan hidrocarburos C3 y C4 y gas de síntesis. S14 corresponde a una corriente mezclada de propileno y propano, mientras que S15 es una mezcla de butano, butadieno y gas de síntesis que, en este modelo, no atraviesa una siguiente etapa de purificación. Es así como, la corriente S16 está compuesta por metano, etileno y etano. En la corriente S17 el metano es separado de los hidrocarburos C2, los cuales corresponden a la corriente S18. Esta corriente atraviesa una siguiente etapa de purificación y el producto (etileno) sale por la corriente S19, mientras que el etano por S20. El etileno es enfriado mediante un intercambiador de calor que utiliza un flujo másico de agua proveniente de S24, S22 corresponde al etileno enfriado y S21 al agua calentada que sale del intercambiador de calor. El etileno es comprimido y finalmente sale por S23.

De la misma manera, el diagrama de flujo simplificado del modelo basado en fermentación de biomasa se muestra en la Figura 3 y en la Figura 4 se muestra el diagrama final del proceso (Tabla 3).

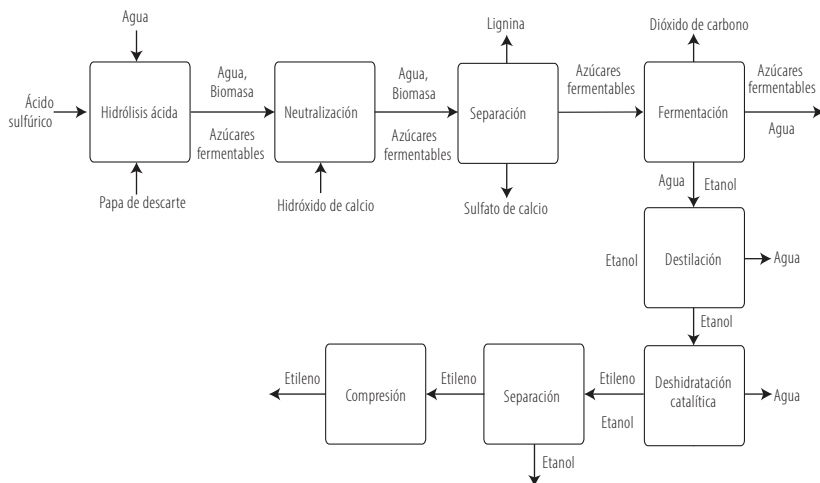


Figura 3. Diagrama de flujo simplificado de la planta de producción de etileno por deshidratación de etanol producido mediante fermentación de biomasa.

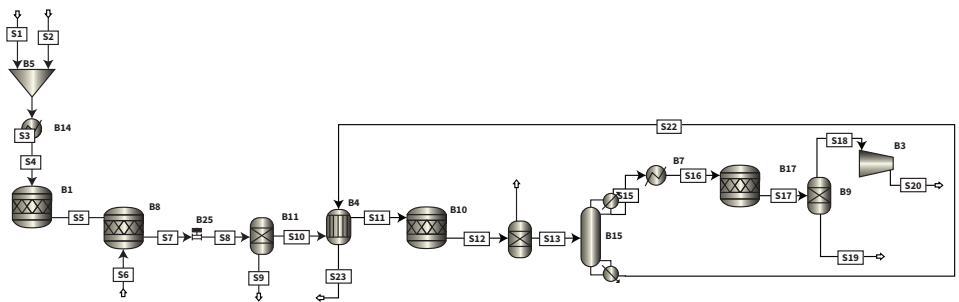


Figura 4. Diagrama de flujo de la planta de producción de etileno por deshidratación de etanol producido mediante fermentación de biomasa, considerando una entrada de materia prima (papas de descarte) de 3.067 t/h.

Tabla 3. Resumen de los parámetros de operación y rendimiento utilizados para el modelaje de los reactores principales donde ocurre la reacción química.

Nomenclatura en la simulación	Tipo de equipo	Condiciones de operación		Conversiones fraccionales	Estequiometría	
B1	Reactor de hidrólisis	120	°C	0.89	Celulosa	$H_2O + C_6H_{10}O_5 \rightarrow C_6H_{12}O_6$
		1.5	bar			
B8	Reactor de neutralización	120	°C	1	Ácido sulfúrico	$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(SO_4) + 2 H_2O$
		1.5	bar			
B10	Tanque de fermentación	27	°C	1	Dextrosa	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 CH_3CH_2OH + 2 CO_2$
		1	bar			
B17	Reactor de deshidratación catalítica	400	°C	0.97	Etanol	$CH_3CH_2OH \rightarrow H_2O + C_2H_4$
		10	bar			

El proceso consta de una etapa de pretratamiento físico de reducción de tamaño que no fue modelada en el *software* utilizado, sin embargo, se asume que, al entrar al proceso, la papa de descarte tiene un diámetro de partícula adecuado. Un flujo másico de biomasa de 3.067 t/h que corresponde a la corriente S1 se mezcla con agua (S2) en una proporción aproximada de 1:10 tomando como base el estudio de Jimenez-Gutiérrez [42]. El proceso es catalizado con ácido sulfúrico, el mismo que también ingresa por S2 y representa un 1 % del flujo de agua. Esta mezcla corresponde a la corriente S3 que posteriormente es calentada sin ningún cambio adicional en su composición y se representa con el flujo S4. Luego, S4 es enviado a una etapa de hidrólisis ácida a 120 °C y 1.5 bar y los productos hidrolizados corresponden a la corriente S5. Posteriormente, el flujo es enviado a una etapa de neutralización donde ingresa hidróxido de calcio sólido (S6) que será removido en una etapa posterior. La corriente S7 corresponde a los productos de la hidrólisis ya neutralizados, estos productos atraviesan una etapa de descompresión (S8) y después son enviados a un separador que remueve la fracción sólida (S9). Los productos de las hidrólisis libres de sólidos (S10) son enviados a un intercambiador de calor que reduce hasta 31 °C para comenzar la etapa de fermentación. El intercambiador de calor opera con un flujo de agua de 32.2 t/h.



La etapa de producción de etanol ocurre en un tanque de fermentación y se asume que 100 % de los azúcares liberados del almidón son fermentados, entonces la corriente S22 corresponde al flujo de agua fría de entrada y el flujo S23 al flujo de agua caliente que ya atravesó el intercambiador de calor. Es así como S11 corresponde a los azúcares fermentables que ingresan al reactor y S12 corresponde a los productos de la fermentación.

Los productos de la fermentación se envían a un separador ideal, el cual elimina el dióxido de carbono generado como subproducto (corriente S13). Posteriormente, el flujo se dirige a un destilador, simulado también como un separador ideal, a través de la corriente S14, donde se concentra el etanol. El etanol obtenido se extrae por la corriente S15 y se conduce hacia un calentador.

El agua separada del alcohol corresponde a la corriente S23, la cual se recircula hacia una etapa previa del proceso. Una vez calentado, el etanol conforma la corriente S16, que alimenta un reactor de deshidratación catalítica con Al_2O_3 , operando a presión atmosférica, 400 °C y 10 bar.

El etileno producido en la deshidratación se obtiene en la corriente S17, la cual se envía a un separador que remueve el agua (corriente S19). El etileno purificado (corriente S18) se conduce a una etapa de compresión, dando lugar al etileno comprimido en la corriente S20.

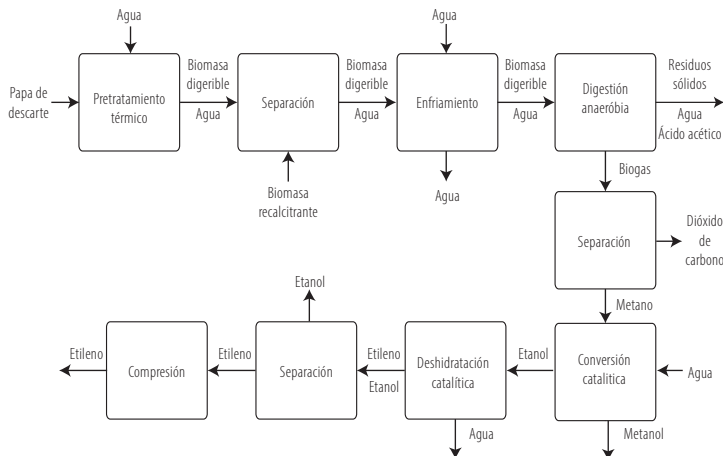


Figura 5. Diagrama de flujo simplificado de la planta de producción de etileno por deshidratación de etanol producido mediante digestión anaeróbica de biomasa seguida de una etapa de conversión catalítica con $Cu-Ni@NiO_2$.

El segundo proceso modelado para la obtención de bioetileno fue la oxidación electrocatalítica del metano con catalizador para producción de alcoholes de bajo carbono, con selectividad mejorada hacia el etanol. Para este proceso se consideró la misma biomasa de alimentación del proceso de fermentación, es decir, tres toneladas de papas de descarte por hora, detallada en el balance de masa, mostrado en la Figura 5 y Figura 6.

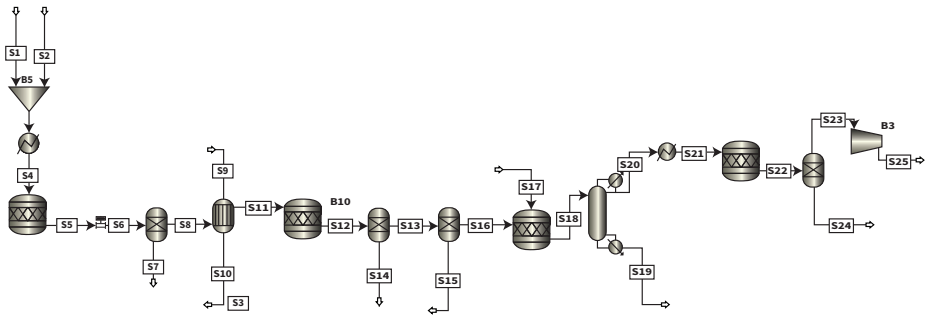


Figura 6. Diagrama de flujo de la planta de producción de etileno por deshidratación de etanol producido mediante digestión anaeróbica de biomasa seguida de una etapa de conversión catalítica con Cu-Ni@NiO₂, considerando una entrada de materia prima (papas de descarte) de 3.067 t/h.

Tabla 4. Resumen de los parámetros de operación y rendimiento utilizados para el modelaje de los reactores principales donde ocurre reacción química.

Nomenclatura en la simulación	Tipo de equipo	Condiciones de operación		Unidades	Conversión fraccional	Conversión fraccional del componente	Estoquiometría
B1	Reactor de hidrólisis	120	1,5	°C bar	0.6	Celulosa	$H_2O + C_6H_{10}O_5 \rightarrow C_6H_{12}O_6$
B10	Tanque de metanización	27	°C	1	Dextrosa	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 CH_3CH_2OH + 2 CO_2$	
				1	Etanol	$2 CH_3CH_2OH + CO_2 \rightarrow 2 CH_3COOH + CH_4$	
		1	bar	0.9	Etanol	$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2 H_2$	
				0.79	Ácido acético	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	
B6	Reactor de conversión catalítica de metano	25	°C	0.55	Metano	$2 CH_4 + H_2O \rightarrow CH_3CH_2OH + 2 H_2$	
						$CH_4 + H_2O \rightarrow CH_3OH + H_2$	
B17	Reactor de deshidratación catalítica	400	°C	0.97	Etanol	$CH_3CH_2OH \rightarrow H_2O + C_2H_4$	
		10					bar

La biomasa que corresponde a la corriente S1 (3.067 t/h) se mezcla con agua (S2) a en una proporción aproximada de 1:10 de manera similar que en el proceso anterior. La corriente S3, a su vez, corresponde al flujo de biomasa-agua que ingresa a un calentador y por consiguiente S4 corresponde al mismo flujo másico después de atravesar un calentador. En este caso, se consideró una etapa de pretratamiento químico en un



reactor a 120 °C y 1.5 bar, no obstante, en este caso no se catalizó la reacción con ningún ácido a diferencia del proceso anterior.

Los productos del pretratamiento (S5) pasan una etapa de descompresión y el flujo se representa como S6, posteriormente son enviados a una etapa de separación donde se remueve la lignina por la corriente S7 y el material no hidrolizado (S8) a un intercambiador de calor que reduce la temperatura del flujo de productos hasta 26 °C para iniciar la etapa de digestión. Las corrientes S9 y S10 corresponden a la entrada y salida de agua del intercambiador de calor respectivamente, mientras que S11 es el producto líquido de la hidrólisis que ingresa a una etapa de fermentación.

El reactor fue diseñado para operar a presión atmosférica y temperatura ambiente bajo condiciones anaeróbicas. Una vez generado el biogás, la corriente S12 se dirige a un separador que remueve el agua (S14). El gas seco resultante (S13) se conduce posteriormente a un segundo separador para eliminar el dióxido de carbono (S15). En la simulación, ambos equipos se representaron como separadores ideales. A continuación, la corriente de metano puro (S16) alimenta un reactor de electrocatálisis, donde el hidrocarburo se transforma en alcoholes simples (principalmente etanol y metanol). El proceso ocurre en presencia de agua (corriente S17) y utilizando un catalizador de Cu-Ni@NiO₂, bajo condiciones ambientales de presión y temperatura.

La corriente resultante (S18), compuesta por alcoholes, se somete a una etapa de separación que permite obtener metanol (S19) y etanol (S20). El etanol separado se conduce a un calentador y, a través de la corriente S21, alimenta un proceso de deshidratación catalítica, siguiendo un esquema análogo al descrito previamente.

El efluente de esta etapa (S22), constituido por una mezcla de etileno y agua, se envía a un separador que produce dos corrientes: etileno puro (S23), que posteriormente se comprime y se obtiene como producto final en la corriente S25, y agua residual (S24), correspondiente al subproducto del proceso de deshidratación catalítica.

El balance de masa y el rendimiento porcentual de etileno con respecto a la masa de materia prima para cada proceso se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados principales de los balances de masa de cada proceso.

Proceso	Materia prima	Flujo de entrada (t/h)	Flujo másico de etileno producido (t/h)	Coproductos	Flujo másico (t/h)
Craqueo de nafta	Nafta	3.067	1.24	Propileno	0.500
				Propano	0.010
				Hidrógeno	0.010
				Monóxido de carbono	0.040
				Butano	0.220
				Metano	0.570
				Etano	0.100
				Butadieno	0.220
Fermentación de papas de descarte	Papas de descarte	3.067	0.13	Hidrocarburos pesados	0.160
				Etanol	0.010
				Sulfato de Calcio	0.420
				Lignina	0.180
Digestión de papas de descarte	Papas de descarte	3.067	0.03	Etanol	0.002
				Metano	0.003
				Metanol	0.050
				Lignina	0.180

Costo de los equipos

Para estimar el costo de los equipos se consideraron las operaciones unitarias principales de cada proceso (Tabla 6 - 7).

Tabla 6. Rendimiento porcentual de etileno con respecto a la masa de materia prima para las diferentes rutas de producción analizadas.

Proceso	Rendimiento porcentual (%)
Craqueo de nafta	40.43
Deshidratación de etanol obtenido por fermentación de biomasa	4.24
Deshidratación de etanol obtenido por digestión de biomasa	0.98

Tabla 7. Estimación del costo de los equipos para la producción de etileno mediante los tres procesos contemplados.

Equipo	Costo total de los equipos
1. Proceso lineal: craqueo térmico de nafta.	
Horno para craqueo térmico	\$2 688 000.00
Intercambiador de calor	\$56 000.00
Compresor centrífugo	\$252 000.00
Torre de refrigeración	\$78 400.00
Columna fraccionadora	\$1 792 000.00
Compresor centrífugo	\$18 900.00
Equipo para envasado	\$18 900.00
Total	\$4 904 200.00
2. Proceso circular: bioetileno mediante deshidratación de etanol previa fermentación.	
Molino de martillos	\$18 270.00
Tanque de fermentación	\$210 000.00
Tanque de neutralización	\$50 400.00
Torre de destilación	\$5 040 000.00
Reactor de conversión catalítica	\$7 560 000.00
Compresor centrífugo	\$7 350.00
Equipo para envasado	\$15 960.00
Total	\$12 901 980.00
3. Producción circular: bioetileno por conversión electrocatalítica de etanol.	
Molino de martillos	\$18 270.00
Tanque reactor para digestión anaerobia	\$210 000.00
Torre de adsorción para enriquecimiento de CH ₄	\$483 000.00
Reactor de conversión electrocatalítica	\$4 200 000.00
Torre de destilación	\$5 040 000.00
Reactor de conversión catalítica	\$2 520 000.00
Compresor centrífugo	\$39 186.00
Equipo para envasado	\$15 960.00
Total	\$13 526 416.00

Además de los costos de los equipos, se estimaron los costos internos de la planta (ISBL), los costos externos (OSBL), los costos de ingeniería, los costos de contingencia, así como la inversión total requerida para los tres procesos productivos analizados (Tabla 8). También se calcularon los costos operativos y variables asociados (Tabla 9).

Para la estimación de los costos internos (ISBL) se aplicó una modificación de la metodología propuesta por Sinnott y Towler [43]. En primer lugar, se recopilaron valores actualizados de equipos a través de portales web y se determinó la cantidad necesaria en función de los



flujos máscicos o volumétricos obtenidos en las simulaciones de proceso. Adicionalmente, se consideró una tasa de nacionalización del 40 % sobre el valor de los equipos, con el fin de reflejar aranceles e impuestos aplicables a la importación en Ecuador. Posteriormente, se aplicaron los factores de Lang y Hand correspondientes, de acuerdo con el tipo de equipo, conforme a la metodología factorial de los mismos autores.

En cuanto a los costos externos (OSBL), estos se estimaron como un porcentaje de los ISBL: 50 % para el proceso basado en craqueo de nafta y 40 % para los dos procesos de origen renovable. Finalmente, los costos de ingeniería y de contingencia se calcularon como un 10 % y 15 %, respectivamente, de la suma de ISBL y OSBL (Tabla 8).

Tabla 8. Estimación del costo total de inversión para los tres procesos productivos analizados.

Proceso	ISBL (\$)	OSBL (\$)	Costos de ingeniería (\$)	Costos de contingencia (\$)	Costo total (\$)
Craqueo de nafta	4 904 200.00	2 452 100.00	1 471 260.00	735 630.00	9 563 190.00
Deshidratación de etanol obtenido por fermentación de biomasa	12 901 980.00	5 160 792.00	3 612 554.00	1 806 277.00	23 481 603.00
Deshidratación de etanol obtenido por digestión de biomasa	12 526 416.00	5 010 566.00	3 507 396.00	1 753 698.00	22 798 077.00

Para el caso de los costos operativos, se estimó la cantidad de trabajadores necesarios para operar las tres plantas modeladas y se estimaron sus salarios anuales. De esta manera, las dos plantas que utilizan procesos verdes de producción tendrían el mismo personal, mientras que la planta que utiliza el proceso de craqueo de nafta tendría más personal en las áreas de técnicos de laboratorio, como operadores, personal administrativo y de seguridad, debido a la cantidad adicional de coproductos producidos.

Por otro lado, los costos de la materia prima fueron obtenidos mediante búsqueda en portales web de proveedores autorizados que operan en el mercado ecuatoriano, así como los costos del servicio eléctrico. En este sentido, los costos variables se reportan en unidades monetarias en dólares americanos por kilogramo de producto principal producido (Tabla 9).

Tabla 9. Estimación de costos operativos y costos variables.

Costos	Craqueo de nafta	Deshidratación de etanol obtenido por fermentación de biomasa	Deshidratación de etanol obtenido por digestión de biomasa
Costos Fijos Operativos anuales (\$)	825 000.00	645 000.00	645 000.00
Costos Variables (\$/Kg de producto)	1.61	6.76	26.98

Los procesos circulares son fundamentales en la búsqueda de sostenibilidad y eficiencia, ya que proponen un modelo donde los recursos son reutilizados, reciclados o regenerados, minimizando así el desperdicio y el impacto ambiental [44]. A diferencia de los procesos lineales que se basan en la secuencia de “extraer, producir, desechar”, los modelos productivos circulares permiten que los materiales tengan una vida útil prolongada y se reincorporen al ciclo productivo, reduciendo la necesidad de extraer nuevas materias. Este enfoque no solo promueve una economía más responsable, sino que también impulsa la innovación, mejora la resiliencia de las cadenas de suministro y contribuye a la conservación de los ecosistemas.

Este trabajo buscó comparar un proceso lineal de producción de etileno mediante craqueo térmico de nafta con dos procesos circulares basados en el aprovechamiento de papa de descarte producida en Ecuador con el fin de obtener bioetileno. Los dos procesos circulares presentan una ventaja significativa con respecto al proceso convencional de producción en términos de aprovechamiento de biomasa residual sin afectar a las cadenas de suministro o utilización adicional de tierras de cultivo, de tal manera que se estaría aprovechando la totalidad de las papas de descarte que se producen en la provincia del Carchi [38]. Sin embargo, ninguno de los dos procesos evaluados es comparable con el proceso productivo tradicional en términos de rendimiento y costos.

Los dos procesos circulares analizados en este estudio tienen como punto de partida los residuos agrícolas para la producción de etileno. Sin embargo, es relevante destacar que las dos rutas sostenibles evaluadas emplean etanol como compuesto precursor. En el caso de la obtención de etanol mediante fermentación de biomasa y posterior deshidratación del alcohol para obtener etileno, la ruta productiva es factible y bien estudiada [45, 46]. No obstante, no es posible obtener rendimientos competitivos debido al alto contenido de agua de la papa, lo que se traduce en una fracción fermentable pequeña [34], incluso cuando una porción importante de esta masa seca es almidón, que fácilmente se hidroliza a azúcares más simples [18].

Por otro lado, si bien la oxidación electrocatalítica del metano para la producción de bioetileno representa una alternativa alineada con varios principios de la química verde, entre ellos, el uso de catálisis para reducir subproductos, el diseño orientado a la eficiencia energética (al operar a presión y temperatura ambiente), la utilización de materias primas renovables, el empleo de materiales de baja toxicidad y bajo impacto ambiental, así como la minimización del uso de solventes [47], el proceso presenta un rendimiento relativamente bajo. En particular, durante la etapa de digestión, la metanización alcanza apenas 0.32 L CH₄/g VSS digeridos [34].



Adicionalmente, la conversión electrocatalítica de metano a etanol utilizando Cu-Ni@NiO₂ como catalizador solamente ha sido estudiada a escala de laboratorio, por lo que, actualmente su implementación debería ser descartada por falta de tecnología de escala industrial.

Adicionalmente, el proceso convencional de producción de etileno por craqueo de hidrocarburos presenta ventajas relevantes, pues, además del alto rendimiento de etileno en comparación con la materia prima inicial (nafta en este caso), se producen otros subproductos útiles en la industria química, tales como propano, propileno y metano, entre otros. Además de que el costo de inversión es significativamente menor (0.41 y 0.42 veces el costo de las plantas por fermentación y digestión, respectivamente). En términos de costos variables, el craqueo de nafta sigue siendo el proceso más competitivo, seguido por el proceso de fermentación de biomasa (4.2 veces más costoso que el proceso de craqueo) y finalmente la digestión anaerobia (16.8 veces más costosa que el craqueo de nafta).

Por otro lado, existe una ventaja de los dos procesos circulares con respecto del proceso lineal en el apartado de costos fijos de operación. Sin embargo, esta ventaja se debe únicamente a la cantidad de coproductos generados, es decir, el proceso de craqueo de nafta permite una mayor cantidad de líneas de negocio en comparación con los dos procesos circulares, y por lo tanto, requiere de personal adicional. En consecuencia, su costo operativo es un 28 % superior al costo de los procesos que utilizan biomasa como materia prima.

Los procesos circulares planteados consideran diferentes aspectos ambientales, tales como el uso de recursos renovables y el aprovechamiento de los residuos de la producción agrícola, minimizando así los “desechos”, ya que se habla del uso de las papas de descarte como materia prima; mientras que, en el proceso lineal, el aspecto ambiental más relevante es el uso de recursos no renovables. Además, estos procesos buscan identificar oportunidades de mejora mediante tecnologías más eficientes y el uso de recursos renovables.

No obstante, toda la nafta consumida durante el proceso de craqueo constituye carbono que no puede ser reincorporado a corto plazo en los ciclos naturales de reciclaje de nutrientes. Este carbono terminará liberándose a la atmósfera en forma de dióxido de carbono, contribuyendo así a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el proceso implica el uso de un recurso no renovable como el petróleo, cuyo consumo excesivo puede acarrear consecuencias tanto económicas como ambientales [48].

CONCLUSIONES

La producción de etileno a partir de nafta es económica y técnicamente más viable que los procesos de bioetileno analizados, pues se trata de un proceso industrial maduro y ampliamente investigado desde hace más de 80 años. Sin embargo, se basa en la secuencia de “extraer, producir, desechar”, con un alto impacto ambiental debido a las cantidades considerables de energía que requiere y las grandes emisiones de gases de efecto invernadero que produce. No obstante, la producción de bioetileno en el Ecuador y en el mundo es técnicamente posible, a pesar de que enfrenta varios desafíos.



A nivel técnico, gran parte de la biomasa utilizada como materia prima no puede ser aprovechada, lo que reduce significativamente los rendimientos. Además, el uso de biorreactores en etapas como la fermentación o la digestión anaerobia requiere un control estricto de las condiciones de operación para garantizar la subsistencia de levaduras, arqueas y otros microorganismos.

En el ámbito económico, el proceso demanda etapas adicionales de pretratamiento de la biomasa antes de las conversiones deseadas (por ejemplo, la deshidratación del etanol). Esto aumenta la complejidad operativa y, en consecuencia, eleva el número de equipos necesarios, la demanda energética global y los costos de operación.

Desde la perspectiva ambiental, reemplazar materias primas convencionales por biomasa residual ofrece ventajas, como el aprovechamiento de desechos que, de otra forma, terminarían en rellenos sanitarios. Además, la oxidación de este tipo de biomasa no contribuye de la misma manera al cambio climático, ya que el carbono puede reciclarse mediante procesos naturales de reutilización de nutrientes. No obstante, las operaciones unitarias que transforman estos materiales suelen requerir reactivos contaminantes o peligrosos, además de condiciones de alta temperatura y presión o largos tiempos de residencia, lo que incrementa el espacio necesario para la planta.

Finalmente, al tratarse de procesos biológicos, los máximos rendimientos solo se alcanzan en condiciones óptimas de operación, las cuales no siempre son factibles. En muchos casos, además, los microorganismos requieren largos periodos de adaptación [49].

Finalmente, se recomienda realizar experimentos a escala de laboratorio o a escala piloto con el fin de optimizar las simulaciones basadas en la revalorización de los residuos agrícolas u otro tipo de residuos ricos en azúcares fermentables considerando rendimientos experimentales, dado que los flujos de producto obtenidos pudieron haber sido subestimados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

El presente trabajo fue realizado como proyecto final de la clase de "Diseño e Ingeniería Circular", que forma parte del p^énsu^m de estudio de la Maestría en Ingeniería Circular de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

Gabriel Vaca, Sonia Quiroga, Kimberly Rizzo y Dimas Pincay realizaron todo el trabajo de diseño bajo la guía de José Álvarez, quien también fue el responsable de verificar el dimensionamiento de los equipos, así como el análisis económico. Todos los autores participaron activamente en la preparación del manuscrito.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron Perplexiy AI y ChatGPT con el único propósito de mejorar la calidad de la redacción del texto y, de manera



ocasional, para orientar la búsqueda de artículos científicos. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles en un repositorio de acceso abierto: Producción sostenible de etileno en Ecuador: análisis comparativo entre craqueo de nafta y procesos basados en biomasa de papa andina de descarte - Datos del modelo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17979929>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no hubo ningún conflicto de interés al realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Bocco, A. M. (1987). *Auge petrolero, modernización y subdesarrollo: el Ecuador de los años setenta*. Quito: FLACSO Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- [2] Fontaine, G. (2002). Sobre las bonanzas y dependencia del Petróleo y enfermedad holandesa en el Ecuador. *Iconos. Revista de Ciencias Sociales*, (13), 102-110.
- [3] Banco Central del Ecuador. (2023). *Análisis del sector petrolero*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP202302.pdf>
- [4] Benalcázar Ordóñez, F. J. (2025). Desafíos y oportunidades de la industria petrolera en Ecuador. *Revista InveCom*, 5(4). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14816573>
- [5] Allaica, J. C. M. (2018). La ecología industrial y la economía circular. Retos actuales al desarrollo de industrias básicas en el Ecuador. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*.
- [6] Kulprathipanja, S., Rekoske, J., Wei, D., Solen, R., Pham, T. V. y Liu, C. (2021). Petrochemical markets. En *Modern petrochemical technology* (pp. 17–42). Wiley.
- [7] Worrell, E., D. Phylipsen, D. Einstein, and N. Martin. (2000). *Energy Use and Energy Intensity of the U.S. Chemical Industry*. <https://doi.org/10.2172/773773>
- [8] Alshammari, A., Kalevaru, V. N., Bagabas, A., & Martin, A. (2016). Production of ethylene and its commercial importance in the global market. En *Petrochemical catalyst materials, processes, and emerging technologies* (pp. 82-115). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9975-5.ch004>
- [9] Fan, D., Dai, D.-J., & Wu, H.-S. (2012). Ethylene formation by catalytic dehydration of ethanol with industrial considerations. *Materials*, 6(1), 101–115. <https://doi.org/10.3390/ma6010101>
- [10] Sundaram, K. M., Shreehan, M. M., & Olszewski, E. F. (2010). Ethylene. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (pp. 1–39). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0520082519211404.a01.pub3>
- [11] The Observatory of Economy Complexity. (October 11, 2025). *Ethylene Polymers in Ecuador*. <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/ethylene-polymers/reporter/ecu>
- [12] Yan, Y., Pang, Y. X., Luo, X., Lin, Q., Pang, C. H., Zhang, H., Gao, X., & Wu, T. (2024). Carbon dioxide-focused greenhouse gas emissions from petrochemical plants and associated industries: Critical overview, recent advances and future prospects of mitigation strategies. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 406–421. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.136>
- [13] Opia, A. C., Hamid, M. K. B. A., Syahrullail, S., Rahim, A. B. A., & Johnson, C. A. N. (2021). Biomass as a potential source of sustainable fuel, chemical and tribological materials. Overview. *Materials Today: Proceedings*, 39, 922–928. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.045>
- [14] Vaithyanathan, V. K., Goyette, B., & Rajagopal, R. (2023). A critical review of the transformation of biomass into commodity chemicals: Prominence of pretreatments. *Environmental Challenges*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100700>
- [15] Dong, X., Lu, D., Fan, Q., & Gong, H. (2023). Mechanisms of ethanol dehydration to ethylene on $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (100) and (110C): A combined DFT and KMC study. *Computational Materials Science*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2022.111979>
- [16] Zhang, M., & Yu, Y. (2013). Dehydration of ethanol to ethylene. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(28), 9505–9514. <https://doi.org/10.1021/ie401157c>
- [17] Irfan, M., Nadeem, M., & Syed, Q. (2014). Ethanol production from agricultural wastes using *Saccharomyces cerevisiae*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(2), 457–465. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000200012>
- [18] Priyanka, M., Kumar, D., Shankar, U., Yadav, A., & Yadav, K. (2018). Agricultural waste management for bioethanol production. En *Handbook of research on microbial tools for environmental waste management* (pp. 1-33). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3540-9.ch001>
- [19] Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>

- [20] Chen, Y., Kuo, M. J., Lobo, R., & Ierapetritou, M. (2024). *Ethylene production: Process design, techno-economic and life-cycle assessments*. *Green Chemistry*, 26(5), 2903–2911. <https://doi.org/10.1039/D3GC03858K>
- [21] Rahimpour, M. R., J. M., & I. D. (2013). Progress in catalytic naphtha reforming process: A review. *Applied Energy*, 109, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.080>
- [22] Silva, A. P., Bahú, J. O., Soccol, R., Rodríguez-Urrego, L., Fajardo-Moreno, W. S., Moya, H., León-Pulido, J., & Cárdenas Concha, V. O. (2023). Naphtha characterization (PIONA, density, distillation curve and sulfur content): An origin comparison. *Energies*, 16(8), 3568. <https://doi.org/10.3390/en16083568>
- [23] EP Petroecuador. (2021). *Informe Estadístico anual 2021*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2024/06/INFORME-ESTADISTICO-ANUAL-2021.pdf>
- [24] Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of cleaner production*, 277, 123741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741>
- [25] Iqbal, M. W., Kang, Y., & Jeon, H. W. (2020). Zero waste strategy for green supply chain management with minimization of energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118827>
- [26] Cavallieri, M. S., Viles, E., & Montoya-Torres, J. R. (2024). Integration of sustainable production criteria into production scheduling: a systematic search and a critical review. *ICORES*, 1. <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0012306000003639>
- [27] Malehmirchegini, L., & Chapman, A. J. (2025). Strategies for achieving carbon neutrality within the chemical industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115762. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115762>
- [28] Zhang, M., & Yu, Y. (2013). *Dehydration of ethanol to ethylene*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(28), 9505–9514. <https://doi.org/10.1021/ie401157c>
- [29] Seifzadeh Haghighi, S., Rahimpour, M. R., Raeissi, S., & Dehghani, O. (2013). Investigation of ethylene production in naphtha thermal cracking plants in presence of steam and carbon dioxide. *Chemical engineering journal*, 228, 1158–1167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.048>
- [30] Meindersma, G. W. (2014). *Extraction of aromatics from naphtha with ionic liquids*. <https://www.researchgate.net/publication/241875069>
- [31] Chuquin Yopez, H. G. (2018). Alternativas de uso de la papa de desecho en la provincia del Carchi y la contaminación con plástico. *SATHIRI*, 2, 11. <https://doi.org/10.32645/13906925.206>
- [32] Davis, R. A. (2007). Parameter estimation for simultaneous saccharification and fermentation of food waste into ethanol using Matlab Simulink. En *Biotechnology for fuels and chemicals: Proceedings of the Twenty-ninth Symposium on Biotechnology for fuels and chemicals held April 29–May 2, 2007, in Denver, Colorado* (pp. 379–389). Humana Press.
- [33] Mohsenzadeh, A., Z. A., & T. M. J. (2017). Bioethylene production from ethanol: A review and techno-economical evaluation. *ChemBioEng Reviews*, 4(2), 75–91. <https://doi.org/10.1002/cben.201600025>
- [34] Parawira, W., Murto, M., Zvauya, R., & Mattiasson, B. (2004). Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy*, 29(11), 1811–1823. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.005>
- [35] Zhang, Q., Li, W., Peng, J., Xue, L., & He, G. (2024). Cold plasma activated Ni⁰/Ni² interface catalysts for efficient electrocatalytic methane oxidation to low-carbon alcohols. *Green Chemistry*, 26(12), 7091–7100. <https://doi.org/10.1039/D4GC00289J>
- [36] Kratky, L., & Zamazal, P. (2020). Economic feasibility and sensitivity analysis of fish waste processing biorefinery. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118677. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118677>
- [37] Torres, M. D., Fradinho, P., Rodríguez, P., Falqué, E., Santos, V., & Domínguez, H. (2020). Biorefinery concept for discarded potatoes: recovery of starch and bioactive compounds. *Journal of Food Engineering*, 275, 109886. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109886>
- [38] INIAP. (2002). *El cultivo de la papa en Ecuador*. <https://cipotato.org/wp-content/uploads/Documentacion%20PDF/Pumisacho%20y%20Sherwood%20Cultivo%20de%20Papa%20en%20Ecuador.pdf>
- [39] Herrera, M., Hathman, C. and Galo C. (1999). *Estudio sobre el subsector de la papa en el Ecuador*. https://cipotato.org/wp-content/uploads/Documentacion%20PDF/subsector_papa_2da.pdf



- [40] Liu, Q., Tarn, R., Lynch, D., & Skjoldt, N. (2007). Physicochemical properties of dry matter and starch from potatoes grown in Canada. *Food Chemistry*, 105(3), 897–907. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.034>
- [41] Alqaheem, Y. (2021). A simulation study for the treatment of Kuwait sour gas by membranes. *Heliyon*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05953>
- [42] Jimenez-Gutierrez, J. M., Verlinden, R. A. J., van der Meer, P. C., van der Wielen, L. A. M., & Straathof, A. J. J. (2021). Liquid hot water pretreatment of lignocellulosic biomass at lab and pilot scale. *Processes*, 9(9), 1518. <https://doi.org/10.3390/pr9091518>
- [43] Sinnott, R., & Towler, G. (2020). Costing and project evaluation. *Chemical engineering design*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102599-4.00006-0>
- [44] Hodson de Jaramillo, E. (2018). Bioeconomía: el futuro sostenible. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(164), 188–201. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.650>
- [45] Lv, J., Wang, D., Peng, L., Guo, X., Ding, W., & Yang, W. (2023). Ethanol dehydration to ethylene over high-energy facets exposed gamma alumina. *Catalysts*, 13(6), 994. <https://doi.org/10.3390/catal13060994>
- [46] Soh, J. C., Chong, S. L., Hossain, S. S., & Cheng, C. K. (2017). Catalytic ethylene production from ethanol dehydration over non-modified and phosphoric acid modified Zeolite H-Y (80) catalysts. *Fuel Processing Technology*, 158, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.012>
- [47] Winterton, N. (2001). Twelve more green chemistry principles. *Green Chemistry*, 3(6). <https://doi.org/10.1039/b110187k>
- [48] Rosero-Rosero, M., Rosero-Rosero, C. C., & Pinargote-Yépez, M. (2024). Costos y decisiones financieras asociadas a la transición de economía lineal a circular en la producción de envases. El caso de Ecuador. *Innovar: Revista de ciencias administrativas y sociales*, 34(94), 1–24. <https://www.jstor.org/stable/27367211>
- [49] Wechselberger, P., Seifert, A., & Herwig, C. (2010). PAT method to gather bioprocess parameters in real-time using simple input variables and first principle relationships. *Chemical Engineering Science*, 65(21), 5734–5746. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.05.002>

Generación de combustibles líquidos mediante el proceso de pirólisis a partir de polipropileno y poliestireno para su aprovechamiento energético

Bryan S. Montalvo Verduga¹, Nicole L. Roman Roman¹, Diana K. Fabara Salazar¹

¹Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

*Autor para correspondencia/corresponding author: bsvmontalvo@gmail.com

Generation of liquid fuels through the pyrolysis process from polypropylene and polystyrene for energy utilization

Resumen

El manejo inadecuado de residuos plásticos plantea un problema ambiental significativo a nivel mundial, con un impacto directo en la contaminación y la disponibilidad de recursos energéticos. La valorización de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) mediante pirólisis representa una alternativa prometedora para la generación de combustibles líquidos. En este estudio, se empleó un reactor de lecho fijo horizontal Shaftherm, evaluando temperaturas de 500, 600 y 700°C con tiempos de 60, 90 y 120 minutos. Se determinó que a temperaturas inferiores a 500°C el proceso era incompleto. Para el PP, el mejor rendimiento líquido (86.64%) se obtuvo a 700°C, mientras que, para el PS, los valores más altos (90.36%-92.63%) se alcanzaron a 600°C y 90 minutos. Los productos líquidos del PP contenían hidrocarburos C2-C10 similares a la gasolina extra comercial, mientras que las fracciones del PS eran ricas en estireno y cadenas de C2-C18. Los valores de poder calorífico oscilaron entre 42 236.64 y 45 005.34 kJ/kg para el PP y entre 37 401.38 y 43 107.50 kJ/kg para el PS, superando el poder calorífico de combustibles comerciales como el diésel y la gasolina extra. Los análisis de calidad mostraron densidad y viscosidad adecuadas para su potencial uso en aplicaciones industriales, y el estudio cromatográfico reveló la presencia de compuestos valiosos para la industria química. Aunque algunos parámetros no cumplieron con las normativas INEN, las fracciones líquidas presentaron similitudes significativas con combustibles comerciales, destacando su viabilidad como fuente energética alternativa.

Palabras clave: Pirólisis, Polipropileno, Poliestireno, Poder Calorífico, Combustibles Líquidos.

Abstract

The improper management of plastic waste poses a significant environmental challenge worldwide, impacting both pollution and energy resource availability. The valorization of polypropylene (PP) and polystyrene (PS) through pyrolysis presents a promising alternative for liquid fuel production. In this study, a horizontal fixed-bed Shaftherm reactor was used, evaluating temperatures of 500, 600, and 700°C with residence times of 60, 90, and 120 minutes. It was determined that at temperatures below 500°C, the process was incomplete. For PP, the highest liquid yield (86.64%) was



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
11/02/2025

Aceptado /
Accepted:
19/05/2025

Publicado en línea /
Published online:
11/12/2025



achieved at 700°C, while for PS, the best results (90.36%-92.63%) were obtained at 600°C and 90 minutes. The liquid products from PP contained C2-C10 hydrocarbons similar to commercial extra gasoline, while the PS fractions were rich in styrene and C2-C18 chains. The calorific values ranged from 42 236.64 to 45 005.34 kJ/kg for PP and from 37 401.38 to 43 107.50 kJ/kg for PS, surpassing the calorific value of commercial fuels such as diesel and extra gasoline. Quality analysis showed suitable density and viscosity for potential industrial applications, and chromatographic studies revealed valuable compounds for the chemical industry. Although some parameters did not meet INEN standards, the liquid fractions exhibited significant similarities with commercial fuels, highlighting their viability as an alternative energy source.

Keywords: pyrolysis, polypropylene, polystyrene, calorific value, liquid fuels.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos plásticos es un problema ambiental creciente a nivel mundial, y Ecuador no es la excepción. En la última década, el consumo de plástico en el país ha aumentado, alcanzando un promedio de 40 kg por habitante al año, lo que genera aproximadamente 712 000 toneladas de residuos plásticos anualmente [1]. Entre estos, el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) son materiales ampliamente utilizados en la fabricación de productos de un solo uso, desde envases de alimentos hasta embalajes industriales [1]. Sin embargo, su reciclaje sigue siendo un desafío, el informe emitido por ASEPLAS [2] reveló que solo el 25% de las empresas recicladoras en Ecuador se dedican al tratamiento del PS, mientras que el 75% restante prioriza el PP, dejando grandes volúmenes de PS sin gestionar adecuadamente. Ante esta problemática, la pirólisis se perfila como una alternativa viable para el reciclaje químico de estos materiales, permitiendo su conversión en productos de valor agregado como combustibles líquidos. A diferencia del polietileno, cuya pirólisis no produce fracciones líquidas adecuadas para combustibles, el PP y el PS pueden generar rendimientos significativos de productos líquidos bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo de residencia [3]. Estudios previos, como el de Pinajota [4], han estimado rendimientos de hasta 68.55% para el PS y 47.18% para el PP en un rango de temperaturas de 500-800°C y tiempos de residencia de 30 minutos. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la producción de combustibles líquidos a partir de PP y PS mediante pirólisis, analizando las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de residencia para maximizar el rendimiento y la calidad del producto obtenido. Se comparará el poder calorífico de los combustibles generados con los combustibles comerciales disponibles en Ecuador, además de realizar un análisis de calidad según las normativas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Los resultados de este estudio buscan contribuir al desarrollo de estrategias sostenibles para la valorización de residuos plásticos en el país, promoviendo la transición hacia una economía circular y la reducción del impacto ambiental asociado a estos desechos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Rampas de temperatura

Las rampas de temperatura se definen en función de la velocidad de aumento de la temperatura del equipo, para así mantener un control adecuado y estable de la temperatura [5]. Para el equipo de pirólisis Shaftherm, se establece una tasa de calentamiento de:

$$\Delta C = 10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \quad (1)$$

Donde:

ΔC = Velocidad de aumento de temperatura

Para determinar las rampas de calentamiento, una ecuación lineal nos permite establecer el comportamiento de la rampa de calentamiento:

$$y = mx + b \quad (2)$$

Donde:

y = Temperatura de operación

$$m = \Delta C \quad (3)$$

x = Tiempo de calentamiento

b = Temperatura ambiente

Considerando un crecimiento lineal del calentamiento, se busca establecer un comportamiento estable en el aumento de la temperatura, describiendo el tiempo de residencia donde ocurre la reacción de pirólisis [6], como se describe en la Figura 1.

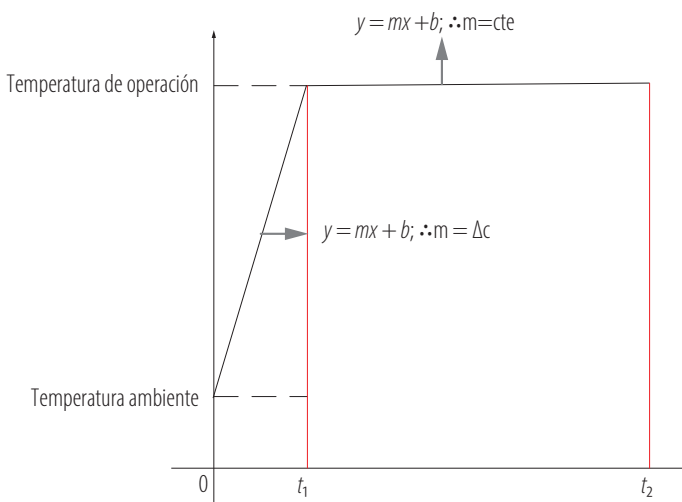


FIGURA 1. Ecuación de rampa de calentamiento.



La ecuación 2 describe el perfil de calentamiento de la rampa desde la temperatura ambiente hasta una tasa constante. Al llegar a 500 °C, 600 °C y 700 °C en 60, 90 y 120 minutos respectivamente, la temperatura se mantiene constante debido al ajuste del equipo.

CUANTIFICACIÓN DE RENDIMIENTOS

La pirólisis produce varios productos útiles como char, gases y líquidos, utilizados en energía renovable, químicos y construcción, favoreciendo la gestión sostenible de residuos y energía alternativa, los cuales se cuantifican mediante un balance de masas [5]. Estos rendimientos se calculan de la siguiente forma:

Rendimiento para fracción líquida:

$$R_{FL} = \frac{M_{FL}}{M_{MO}} 100\% \quad (4)$$

Rendimiento para fracción sólida:

$$R_{FS} = \frac{M_{FS}}{M_{MO}} 100\% \quad (5)$$

Rendimiento para fracción gaseosa:

$$R_{FG} = 100 - R_{FL} - R_{FS} \quad (6)$$

Donde:

R_{FL} = rendimiento fracción líquida

R_{FS} = rendimiento fracción sólida

R_{FG} = rendimiento fracción gaseosa

M_{FL} = masa de la fracción líquida

M_{FS} = masa recuperada de la fracción sólida

M_{FG} = masa de muestra de ps o pp

Adicionalmente, se utilizó la correlación de Pearson para analizar la relación entre las variables de proceso (temperatura y tiempo de residencia) y el rendimiento líquido obtenido. Este análisis permitió identificar las condiciones óptimas para maximizar la conversión de los polímeros en fracciones líquidas aprovechables. Los coeficientes de correlación obtenidos indicaron una relación significativa entre la temperatura y el rendimiento, evidenciando que un incremento en la temperatura favorece la producción de líquidos hasta un punto óptimo, tras el cual se observa una mayor generación de gases.

PIRÓLISIS CATALÍTICA DE LECHO FIJO

Preparación de la muestra de polipropileno

Se adquieren tarrinas de polipropileno biorientado (BOPP), triturados y limpios, con un tamaño de partícula que oscila entre 0 mm y 8 mm de largo y ancho, manteniendo aproximado este tamaño de partícula para la reacción [7], en la Figura 2 se describe el tratamiento que se le da al polipropileno.

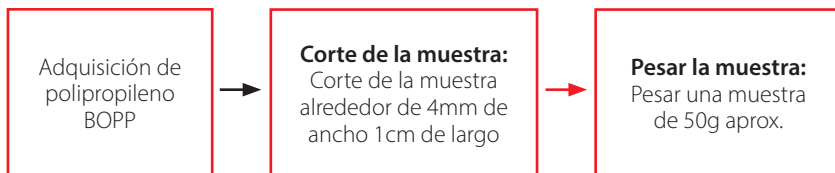


FIGURA 2. Diagrama metodológico de tratamiento de polipropileno.

Preparación de la muestra de poliestireno

El poliestireno de baja densidad requiere compactación para reducir su volumen, o en su defecto, se puede utilizar poliestireno de alta densidad [8]. Se obtuvo una muestra de 3 kg de poliestireno, compuesta por partículas rojas y blancas, la cual fue donada por *Plastinmega S.A.*, en la Figura 3 se describe el tratamiento que se le da al poliestireno.



FIGURA 3. Diagrama metodológico de tratamiento de poliestireno.

Proceso de pirólisis de lecho fijo

El reactor de pirólisis de lecho fijo, en sus configuraciones vertical u horizontal, se mantiene estacionario y se calienta de forma indirecta. A diferencia de otros diseños, se calienta su base, creando un gradiente térmico a lo largo de las paredes, lo que simplifica la gestión del proceso [9].

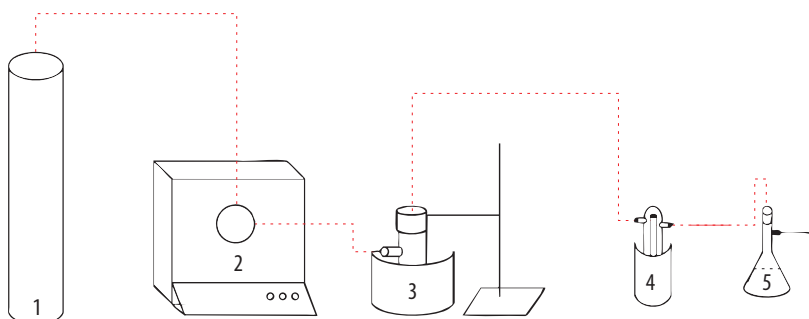


FIGURA 4. Sistema de pirólisis de lecho fijo.

En el esquema mostrado en la Figura 4 se representa el proceso de pirólisis de lecho fijo, diseñado y establecido para el tratamiento de poliestireno y polipropileno. Según el esquema, se muestra:

1. El tanque de nitrógeno suministra un flujo de gas que permite generar una atmósfera neutra, condición esencial para el desarrollo eficiente de la pirólisis. La presencia de este gas inerte es importante para prevenir la oxidación de los materiales y garantizar condiciones óptimas para el proceso [10]. Para garantizar este ambiente, se mantiene un flujo constante de nitrógeno durante 10 minutos previos al inicio de la operación.
2. El reactor Shaftherm (Figura 5) es un equipo de pirólisis de lecho fijo horizontal compuesto por una celda de cuarzo, en la cual se desarrolla el proceso de pirólisis. Dispone de dos válvulas, propias de su diseño horizontal: una para la entrada del gas de N_2 y otra para la salida de los productos generados durante la pirólisis. Como catalizador se utilizan dos bloques de alúmina. El reactor opera mediante rampas de calentamiento y se deben seguir las instrucciones y configuraciones del manual para su correcto funcionamiento.



FIGURA 5. Reactor de pirólisis Shaftherm.

Se debe mantener la muestra de ambos tipos de plástico entre dos bloques de alúmina, como se muestra en la Figura 6.



FIGURA 6. Disposición de las alúminas.

Se optó por esta configuración para aprovechar las propiedades de la alúmina, que muestra una alta capacidad para adsorber gases, vapor de agua y ciertos líquidos de forma selectiva debido a su alta área superficial y estructura porosa [11]. Además, la alúmina actúa como un catalizador al facilitar la descomposición térmica del polipropileno y poliestireno, mediante la ruptura de enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno, lo que proporciona sitios activos para el craqueo catalítico [12].

Incluir ambas alúminas prolonga el tiempo de permanencia y retiene el gas en el lecho fijo durante la pirólisis, permitiendo alcanzar las temperaturas y tiempos deseados, esto se muestra en la Figura 7. Esta estrategia garantiza una mayor eficiencia en la descomposición térmica de los materiales, mejorando el tiempo de residencia según lo establecido por Alonso [1].

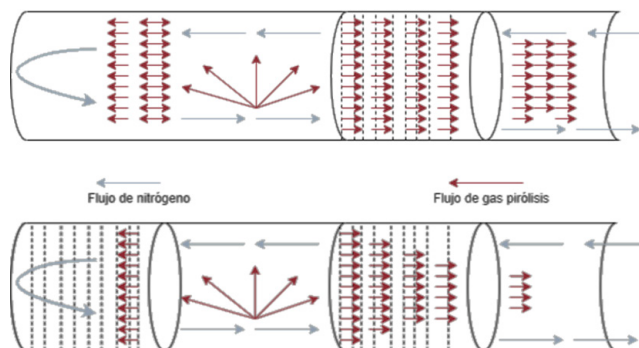


FIGURA 7. Acción de la alúmina.

Estas condiciones se mantienen a una presión constante de 1.01 Bar para controlar el flujo constante de N_2 y el control del flujo de salida del gas.

1. La primera trampa de condensación de gases se configuró utilizando un kitasato de 500 mL [13], el cual se sumergió en un recipiente de agua con hielo y sal en grano para mantenerlo a una temperatura entre 0 y 5°C.
2. Se implementó una segunda trampa de gases como precaución ante un posible exceso de gas condensable o fracción líquida.
3. Se añadió un burbujeador con un kitasato para comprobar el sellado hermético del sistema y garantizar que funcione como extractor de gases tóxicos o volátiles generados durante la pirólisis.

DESTILACIÓN

Después de cuantificar los productos líquidos obtenidos de la pirólisis de polipropileno, se llevó a cabo un proceso de destilación a presión atmosférica con el fin de separar los compuestos más ligeros de los más pesados, particularmente la fracción líquida de la parafina (Figura 8). Este procedimiento no ha sido ampliamente reportado en metodologías previas y fue identificado en el presente estudio como una estrategia efectiva para mejorar la caracterización del producto obtenido. En la Figura 8 se muestra un esquema del sistema utilizado para la destilación, el cual consistió en un balón de destilación acoplado a una termocupla y un termómetro para registrar la variación de la temperatura de ebullición, así como una probeta para la recolección de los productos ligeros destilados [14].



FIGURA 8. Sistema de destilación.

PARÁMETROS DE CALIDAD

Las pruebas de calidad se llevaron a cabo siguiendo las normas establecidas por el INEN para la calidad de combustibles, además del manual de Control de Calidad de Petróleo y Derivados de la carrera de Ingeniería en Petróleos de la FIGEMPA. La Tabla 1 muestra el método o equipo utilizado para la medición de dichos parámetros.

TABLA 1. Parámetros de calidad de combustibles.

Prueba	Método/Equipo
Poder calorífico	Uso Parr 6400 Calormeter
Punto de inflamación	Uso flash point tester
Densidad	Método gravimétrico
Gravedad API	ASTM D 1298-12b
Viscosidad	Viscosímetro de Oswald
Cromatografía	Cromatografía de gases - Espectrometría de masas

RESULTADOS

En la Figura 9 y la Figura 10 se presentan los rendimientos de recuperación de fracción líquida, sólida y gaseosa con respecto a la temperatura para el proceso de pirólisis de una muestra de 50g de poliestireno y polipropileno a temperaturas de 500 °C, 600 °C y 700°C, con un tiempo de residencia de 60, 90 y 120 minutos respectivamente. Mediante el proceso experimental se obtuvieron los siguientes resultados:

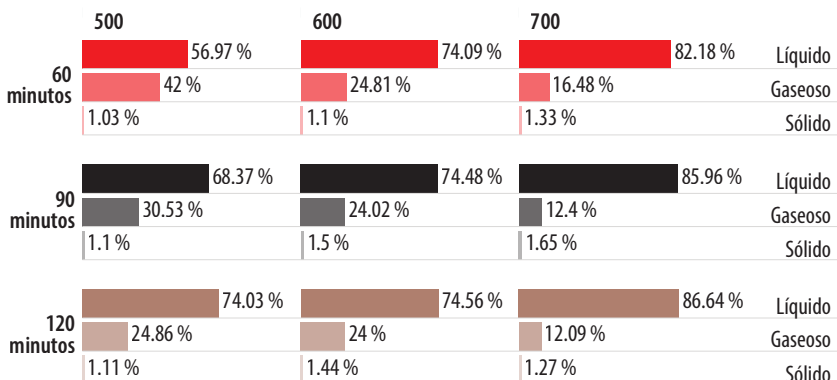


FIGURA 9. Rendimiento de fracción líquida, sólida y gaseosa de polipropileno.

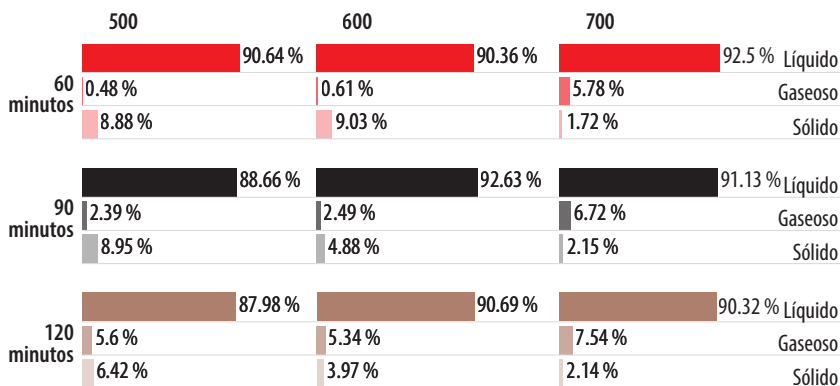


FIGURA 10. Rendimiento de fracción líquida, sólida y gaseosa de poliestireno.

Mediante el análisis de la correlación de Pearson, obtenemos el comportamiento de la temperatura, el tiempo, el rendimiento y cómo estos se relacionan entre sí para las muestras de polipropileno. Los valores de correlación se presentan en la Tabla 2, y su representación gráfica se muestra en la Figura 11.

TABLA 2. Valores de correlaciones de polipropileno

	Rendimiento	Temperatura	Tiempo
Rendimiento	1.000	0.804	0.269
Temperatura	0.804	1.000	-0.097
Tiempo	0.269	-0.097	1.000

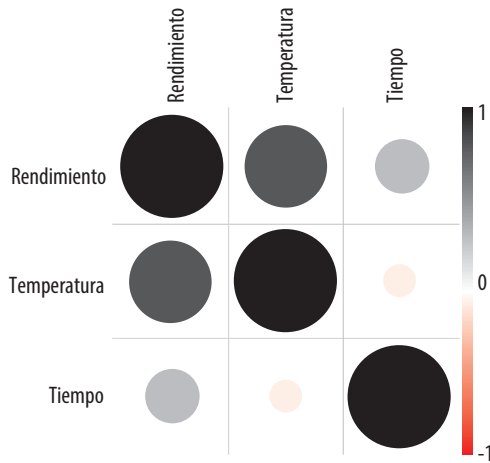


FIGURA 11. Correlación de datos de polipropileno con variables independientes.

De manera similar, para las muestras de poliestireno, los valores de correlación obtenidos se muestran en la Tabla 3 y su representación visual se presenta en la Figura 12.

TABLA 3. Valores de correlaciones de poliestireno.

	Rendimiento	Temperatura	Tiempo
Rendimiento	1.000	0.559	-0.376
Temperatura	0.559	1.000	0.000
Tiempo	-0.376	0.000	1.000

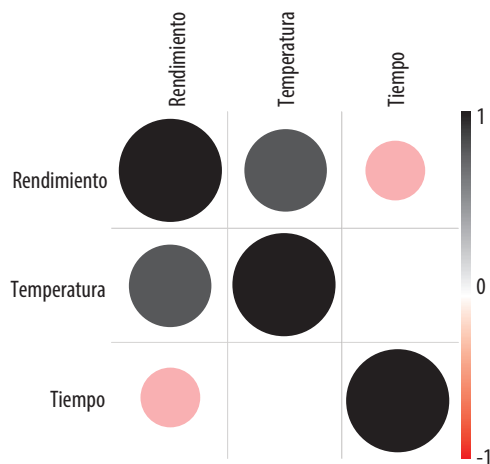


FIGURA 12. Correlación de datos de poliestireno con variables independientes.



Mediante el análisis de cromatografía de masas se identificaron los componentes presentes en las fracciones líquidas obtenidas a partir del polipropileno y poliestireno, los cuales se describen en la Tabla 4 y Tabla 5.

TABLA 4. Cromatografía de fracción líquida de polipropileno a 500 °C, 600 °C, 700 °C.

Temperatura (°C)	Cadenas de carbono más frecuentes	Compuestos representativos	Observaciones
500	C6-C12	Alcanos, alquenos, alquinos, cicloalcanos, compuestos aromáticos (benceno, tolueno), aldehídos, cetonas, alcoholes.	Degradación inicial, formación de una variedad de productos. Menor volatilidad.
600	C3-C5	Propeno, buteno, penteno, etano, propano, butano, 2-hexenal, 2,4-hexadien-1-ol, 3-penten-2-ona (E)-.	Mayor fragmentación de las cadenas de carbono. Aumento de la oxidación. Mayor volatilidad.
700	C3 (propeno)	Propeno, etano, propano, buteno, penteno.	Descomposición casi completa en el monómero. Menor oxidación. Mayor volatilidad.

TABLA 5. Cromatografía de fracción líquida de poliestireno a 500 °C, 600 °C, 700 °C.

Temperatura (°C)	Cadenas de carbono más frecuentes	Compuestos representativos	Observaciones
500	C8 (estireno)	Estireno, α -metilestireno, 2,4-difenil-1-buteno, 1,3-difenilpropano, 2,4,6-trifenil-1-hexeno, dibutil ftalato.	Degradación inicial, formación de oligómeros de estireno. Presencia de compuestos oxigenados (posiblemente aditivos).
600	C8 (estireno)	Estireno, benceno, tolueno, etilbenceno, N-(2-metilbencil) bencimidazol, dibutil ftalato.	Aumento de la producción de estireno. Disminución de oligómeros. Presencia de compuestos nitrogenados y oxigenados (posibles impurezas o reacciones secundarias).
700	C8 (estireno)	Estireno, benceno, tolueno, etilbenceno, trazas de compuestos nitrogenados y oxigenados.	Predominio casi exclusivo de estireno. Menor diversidad de compuestos aromáticos sustituidos. Trazas de compuestos nitrogenados y oxigenados.

Las fracciones líquidas obtenidas fueron caracterizadas conforme a los parámetros definidos en la normativa INEN para combustibles, posterior a la ejecución de las pruebas descritas en la sección de Métodos (Tabla 6 y Tabla 7).

TABLA 6. Parámetros obtenidos para el polipropileno comparados con los valores de gasolina y diésel establecidos en las normas INEN de calidad de combustibles.

Propiedad analizada	Temperaturas de pirólisis para el poliestireno			Gasolina comercial	Diesel comercial	Normativa
	500 °C	600 °C	700 °C			
Poder calorífico (kJ/kg)	43 303.69	44 307.36	45 088.91	43 500.00	42 600.00	[15]
Densidad (kg/m ³)	773.10	757.03	717.86	720.00-775.00	820.00-845.00	[16]
° API	50.90	54.70	65.34	55	38	[17,18]
Viscosidad	3.16	2.62	4.55	1.17	2.00-5.00	[18]
Punto de Inflamación	27.33	26.67	28.33	Min 43	Min 51	[16,17]
N° de carbonos	C6-C12	C3-C5	C3	C5-C10	C14-C20	[19]

TABLA 7. Parámetros obtenidos para el poliestireno comparados con los valores de gasolina y diésel establecidos en las normas INEN de calidad de combustibles.

Propiedad analizada	Temperaturas de pirólisis para el poliestireno			Gasolina comercial	Diesel comercial	Normativa
	500 °C	600 °C	700 °C			
Poder calorífico (kJ/kg)	39 172.18	38 690.48	40 252.03	43 500.00	42 600.00	[15]
Densidad (kg/m ³)	920.69	928.33	929.79	720.00-775.00	820.00-845.00	[16]
° API	21.60	20.32	20.08	55	38	[17,18]
Viscosidad	3.45	3.64	3.88	1.17	2.00-5.00	[18]
Punto de Inflamación	31.67	31.67	32.33	Min 43	Min 51	[16,17]
N° de carbonos	C8	C8	C8	C5-C10	C14-C20	[19]

DISCUSIÓN

Rendimiento del polipropileno

La Figura 9 muestra que el rendimiento líquido del polipropileno varía entre 56.97 % (500 °C, 60 min) y 86.64 % (700 °C, 120 min), evidenciando que un mayor tiempo y



temperatura favorecen la obtención de una mayor fracción líquida. Esta relación se ve respaldada por una correlación positiva y significativa ($r = 0.804$; Tabla 2).

Estos resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado que temperaturas elevadas y tiempos prolongados incrementan la conversión de polímeros en productos líquidos [4]. La fracción sólida oscila entre 1.03 % y 1.65 %, sin mostrar una tendencia clara, aunque su color se intensifica conforme aumenta la temperatura. La fracción gaseosa es inversamente proporcional a la líquida, con un rendimiento máximo de 42.00 % a 500°C (60 min) y un mínimo de 12.09 % a 700 °C (120 min). Esta tendencia sugiere que, a temperaturas más altas, la conversión de material sólido en gas disminuye, aumentando la cantidad de líquido producido [5].

Rendimiento del poliestireno

De acuerdo con la Figura 10, el rendimiento líquido del poliestireno varía entre 87.96 % (500 °C, 120 min) y 92.63 % (600°C, 90 min), mostrando una fuerte correlación positiva con la temperatura ($r = 0.550$) e inversamente con el tiempo de residencia. Resultados similares han sido reportados en estudios previos, indicando que el PS tiene una mayor estabilidad en la formación de estireno a distintas temperaturas, lo que refuerza su viabilidad como combustible alternativo [6]. La fracción sólida oscila entre 1.72 % y 9.03 %, sin una tendencia definida, presentándose en forma de pequeñas láminas de carbón con trazas brillantes, la mayoría de las cuales se adhieren a la alúmina. La fracción gaseosa, que es directamente proporcional al tiempo de residencia, presenta un rendimiento mínimo de 0.48 % a 500 °C (60 min) y un máximo de 7.54 % a 700 °C (120 min), lo que indica que a temperaturas más altas y con mayor tiempo de pirólisis, se genera más gas [7].

Poder calorífico

El poder calorífico del polipropileno (PP) varía entre 42 236.64 kJ/kg y 45 005.34 kJ/kg, valores que superan los de combustibles convencionales como el diésel (36 497.80 kJ/kg) y la gasolina extra (39 690.92 kJ/kg).

En el caso del poliestireno (PS), los valores de poder calorífico fluctúan entre 37 401.38 kJ/kg y 43 107.50 kJ/kg, situándose cerca de los valores del diésel y la gasolina extra, aunque sin una tendencia clara. Estudios previos han reportado valores similares, indicando que los combustibles obtenidos por pirólisis de PP y PS tienen un alto potencial energético comparable con los combustibles comerciales [16].

Cumplimiento con normativas

La fracción líquida del PP cumple parcialmente con la normativa INEN para gasolina, debido a que su composición energética y la presencia de compuestos volátiles son compatibles con los parámetros requeridos para su uso como combustible. Sin embargo, la presencia de ciertos compuestos como alcanos y aromáticos podría requerir más ajustes para cumplir completamente con las normativas de calidad de combustibles, especialmente en términos de punto de inflamación y densidad [17]. Por otro lado, el PS muestra una mayor presencia de estireno en sus fracciones líquidas, lo que lo hace más adecuado para la combustión, aunque algunos compuestos oxigenados podrían afectar su viabilidad comercial [18].



CONCLUSIONES

Los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) presentan un alto potencial energético. El PP exhibe un poder calorífico superior al de los combustibles comerciales como el diésel y la gasolina, con valores entre 42 236.64 kJ/kg y 45 005.34 kJ/kg. Por su parte, el PS, aunque con variabilidad, alcanza un poder calorífico máximo de 43 107.50 kJ/kg a 700 °C, lo que lo hace comparable a los combustibles convencionales [15].

Las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento de combustibles líquidos fueron determinadas en este estudio. Para el PP, las mejores condiciones se logran a 700 °C durante 120 minutos, obteniendo un rendimiento del 86.64 %. En el caso del PS, las condiciones ideales son a 600 °C durante 90 minutos, con un rendimiento del 92.63 %.

Si bien los parámetros de calidad de los combustibles obtenidos muestran similitudes con los combustibles fósiles comerciales, la limitación en el volumen de la fracción líquida impidió realizar todas las pruebas necesarias, lo que dificulta una categorización definitiva del tipo de combustible. Sin embargo, los resultados obtenidos indican un notable potencial para su aplicación industrial, contribuyendo a la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Ingeniera Diana Fabara, quien desempeñó un papel clave como tutora y coautora de este proyecto. Al Doctor Raúl Bahamonde, por su apoyo, orientación y confianza en este trabajo. De igual forma, extendemos nuestra gratitud a los docentes Daniel Zurita, Alfredo Maldonado y Verónica Rodríguez, cuyo respaldo académico fue esencial para la correcta ejecución de este proyecto. Agradecemos de manera especial a la Facultad de Ingeniería Ambiental, Ciencias Químicas y de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador por confiar en nuestra propuesta y proporcionarnos las herramientas necesarias para alcanzar los objetivos planteados. Finalmente, reconocemos y agradecemos a la empresa Plastinmega por su generosidad al donar la materia prima que permitió llevar a cabo las pruebas experimentales, contribuyendo de manera significativa al éxito de este estudio.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Nicole Lisbeth Roman Roman: conceptualización, desarrollo del proyecto, diseño metodológico, adaptación del equipo de pirólisis para optimizar la valorización de polipropileno (PP) y poliestireno (PS), preparación y evaluación del catalizador de alúmina, ejecución de experimentos en el reactor de lecho fijo, análisis cromatográfico de las fracciones líquidas, análisis estadístico avanzado, interpretación de los resultados relacionados con las propiedades físico-químicas de los combustibles generados, comparación del poder calorífico con combustibles comerciales, y redacción del borrador original del manuscrito.



Bryan Smith Montalvo Verduga: conceptualización, desarrollo del proyecto, diseño metodológico, supervisión y ajustes técnicos del equipo de pirólisis, implementación de las rampas de temperatura y tiempos de reacción, curación de datos experimentales, análisis de las fracciones líquidas y su potencial energético, interpretación de resultados para evaluar su viabilidad industrial, redacción del manuscrito y revisión crítica del contenido.

Diana Karina Fabara Salazar: colaboración en la conceptualización y diseño metodológico, elaboración del marco teórico relacionado con la valorización de plásticos mediante pirólisis, obtención y gestión del reactor de pirólisis, coordinación del uso de equipos en la Universidad Central del Ecuador para análisis de parámetros de los combustibles (densidad, viscosidad y composición), apoyo en la interpretación de los resultados experimentales y su aplicación industrial, y revisión crítica del manuscrito.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores Bryan Montalvo y Nicole Román utilizaron ChatGPT (OpenAI) con el propósito de realizar revisiones ortográficas y de redacción. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos generados o analizados durante el presente estudio estarán disponibles en un repositorio de acceso abierto al momento de la publicación. Los conjuntos de datos incluyen resultados experimentales del proceso de pirólisis, parámetros operacionales y datos analíticos de caracterización de combustibles líquidos.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no tienen conflictos de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] ASEPLAS. (2023). INTEGRA- Revista de la asociación ecuatoriana de plásticos. *INTEGRA, Estadísticas Del Sector del Plástico*, 32-33. https://aseplas.ec/wp-content/uploads/2024/09/REVISTA-INTEGRA-EDICION-76-PDF-PARA-WEB_compressed.pdf
- [2] ASEPLAS. (2023). *Fortalecimiento de la cadena de reciclaje de poliestireno y polipropileno*. <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2024/01/4.-Informe-Componente-1-Clu%CC%81ster-Pla%CC%81sticos.pdf>
- [3] Alonso, J. (2022). *Revisión y casos prácticos de reciclaje químico de residuos poliméricos: optimización parámetros de pirólisis de residuos de LDPE para el aprovechamiento de biofuel* [Tesis de grado, Universidad de Jaén]. Repositorio Institucional – Universidad de Jaén. <https://crea.ujaen.es/handle/10953.1/18132>
- [4] Pinajota Ilbay, O. G. (2018). *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/e1d906d0-2c03-4ae9-b286-01f0fab2293c>
- [5] Altamirano, J., & Pro-Mamani, A. (2023). *Evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de neumáticos fuera de uso* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/8148/253T20230674_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] Menares, T., Herrera, J., Romero, R., Osorio, P., & Arteaga-Pérez, L. E. (2020). Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime. *Waste Management*, 102, 21-29. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.10.027>
- [7] Ramos, W., Pretell, V., & Lujan, C. (24-26 de julio de 2019). *Catalytic pyrolysis of polypropylene residues for the obtaining of liquid fuels* [Discurso principal]. Industria, innovación e infraestructura para ciudades y comunidades sostenibles: Actas de la 17.ª Multiconferencia Internacional LACCEI para Ingeniería, Educación y Tecnología, Bahía Montego, Jamaica. <https://laccei.org/LACCEI2019-MontegoBay/meta/FP302.html>
- [8] Aguilar, A. M. G., Ávila, J. M. R., Blancas, F. E., & del Cueto, M. E. T. (2020). Caracterización del proceso de pirólisis de residuos de poliestireno expandido. *Ingenio Magno*, 11(2), 135-146. <https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2185>
- [9] Chivatá, D., & Duarte, C. (2018). *Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis* [Tesis de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional – Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6705>
- [10] López, M. (2021). Análisis de las tecnologías de pirólisis y gasificación para el uso de un residuo agroindustrial de cáscara de naranja como material bioenergético, desde una perspectiva de análisis termocinético. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 25(2), 28 -39. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/244>
- [11] Sadeghbeigi, R. (2020). *Fluid catalytic cracking handbook* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812663-9.00004-7>
- [12] Zafarnak, S., & Rahimpour, M. R. (2024). Zeolite and molecular sieves for natural gas dehydration. *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications*, 199-212. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19221-0.00002-8>
- [13] Angurell, I., Casamitjana, N., & Caubet, A. (25 de marzo de 2014). *Técnicas y operaciones avanzadas en el laboratorio químico*. El trabajo con gases. <https://www.ub.edu/ta/q/es/node/195>
- [14] Crespo, S. (2013). *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional – Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6661>
- [15] Khan, M., Sultana, M., Al-Mamun, M., & Hasan, M. (2016). Pyrolytic waste plastic oil and its diesel blend: fuel characterization. *Journal of environmental and public health*, 2016(1), 78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/7869080>
- [16] Ayanoğlu, A., & Yumrutaş, R. (2016). Production of gasoline and diesel like fuels from waste tire oil by using catalytic pyrolysis. *Energy*, 103, 456-468. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.155>



- [17] Zonalegal (2022). *Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1489 (8R). Productos derivados del petróleo*. <https://zonalegal.net/uploads/documento/DIESEL.%20REQUISITOS.pdf>
- [18] Ahmad, I., Khan, I., Khan, H., Ishaq, M., Khan, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2017). Influence of waste brick kiln dust on pyrolytic conversion of polypropylene into potential automotive fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126, 247-256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.06.002>
- [19] Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 30. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5522/1/Oswaldo-Proa%C3%B1o.pdf>

Cálculo del desequilibrio en motores de corriente alterna

José Luis Hernández Corona^{1*} , Jonny Carmona Reyes¹ , Román Daniel Romero Mitre¹ 

¹Maestría en gestión y procesos industriales, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Tlaxcala, Huamantla, Tlaxcala, México.

*Autor para correspondencia/ corresponding author: coronaluis@uttlaxcala.edu.mx

Unbalance calculation in altering current motors

Resumen

El estudio tiene como objetivo analizar el desequilibrio en motores de corriente alterna con velocidad variable, específicamente en motores asíncronos, para identificar y controlar los fenómenos de resonancia e inestabilidad que surgen durante la operación a diferentes velocidades. Estos fenómenos pueden provocar vibraciones excesivas, daños en los componentes mecánicos y reducción de la vida útil del motor. Para ello, se realizó un análisis dinámico de un rotor trifásico, utilizando un modelo matemático que considera los coeficientes de rigidez y amortiguamiento de los rodamientos, así como las fuerzas de excitación y las condiciones de lubricación. El rotor se dividió en tres secciones, y se simuló su comportamiento bajo condiciones de desbalance utilizando software de análisis dinámico (Rotor Dynamics Analysis). Además, se realizaron mediciones prácticas de vibraciones con un equipo analizador CSI 2130 para validar los resultados obtenidos en la simulación. Los resultados mostraron la presencia de dos velocidades críticas, una a 800 rpm y otra a 1600 rpm, donde se observaron amplitudes máximas de vibración y condiciones de resonancia. Estas velocidades críticas representan un riesgo significativo para la operación del motor, ya que pueden provocar inestabilidades y daños en los componentes mecánicos. El estudio concluye que es fundamental evitar operar el motor en estas velocidades críticas para prevenir fallos y garantizar su funcionamiento seguro y eficiente. Además, se destaca la importancia de realizar análisis modales y mantenimiento preventivo regular para identificar y mitigar posibles problemas antes de que se conviertan en críticos. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para optimizar la operación de motores asíncronos en aplicaciones industriales, especialmente en procesos que requieren variación de velocidad, contribuyendo así a mejorar la eficiencia energética y reducir los costos de mantenimiento.

Palabras clave: amortiguamiento, análisis dinámico, coeficientes de rigidez, mantenimiento predictivo, motores asíncronos, resonancia, velocidades críticas, vibraciones.

Abstract

The study aims to analyze the imbalance in alternating current motors with variable speed, specifically in asynchronous motors, to identify and control resonance and instability phenomena that arise during operation at different speeds. These phenomena can cause excessive vibrations, damage to mechanical components, and reduced motor lifespan. To achieve this, a dynamic analysis of a three-phase rotor was conducted using



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
21/02/2025

Aceptado /
Accepted:
26/09/2025

Publicado en línea /
Published online:
10/04/2026



a mathematical model that considers the stiffness and damping coefficients of the bearings, as well as excitation forces and lubrication conditions. The rotor was divided into three sections, and its behavior under unbalanced conditions was simulated using dynamic analysis software (Rotor Dynamics Analysis). Additionally, practical vibration measurements were taken using a CSI 2130 analyzer to validate the simulation results. The results revealed the presence of two critical speeds, one at 800 rpm and the other at 1600 rpm, where maximum vibration amplitudes and resonance conditions were observed. These critical speeds pose a significant risk to motor operation, as they can lead to instabilities and damage to mechanical components. The study concludes that it is essential to avoid operating the motor at these critical speeds to prevent failures and ensure safe and efficient operation. Furthermore, it highlights the importance of conducting modal analysis and regular preventive maintenance to identify and mitigate potential issues before they become critical. The findings provide valuable insights for optimizing the operation of asynchronous motors in industrial applications, particularly in processes requiring variable speed, thereby contributing to improved energy efficiency and reduced maintenance costs.

Keywords: damping, dynamic analysis, stiffness coefficients, predictive maintenance, asynchronous motors, resonance, critical speeds, vibrations.

INTRODUCCIÓN

El constante cambio tecnológico en los motores de inducción ha permitido mejorar su eficiencia, la reducción de pérdidas energéticas y la adaptación a sistemas variables de operación; por estos cambios, se hace conveniente estudiar los fenómenos rotodinámicos. La operación a velocidades y frecuencias variables trae fenómenos de resonancia e inestabilidad, lo cual permite desarrollar investigaciones para optimizar su operación y reducir pérdidas energéticas, logrando que estos motores sean adaptables a una gran variedad de aplicaciones industriales. Es importante tener en cuenta que la investigación y el desarrollo en este campo siguen evolucionando para abordar los desafíos actuales y futuros en la eficiencia energética y de sostenibilidad.

La existencia de investigaciones relacionadas a estudios eléctricos de motores se describe brevemente a continuación. Diversos estudios analizan parámetros eléctricos que intervienen en los cambios de velocidad en motores asíncronos, como la corriente y la tensión, en función de la velocidad, así como los fenómenos de estabilidad, transitorios y armónicos, estos fenómenos permiten ser estudiados más a fondo en su funcionamiento [1].

Actualmente, uno de los dispositivos eléctricos más utilizados en el mundo es el motor asíncrono de CA. En los países industrializados se aplican ampliamente en procesos industriales por su bajo costo y versatilidad [2]. Estos dispositivos pueden consumir entre el 40 y el 50 % de la energía. En todas las industrias son la columna vertebral de muchos procesos de fabricación. Debido a la importancia del uso y funcionamiento continuo de estos motores, sus fallas pueden paralizar una industria o parte de una industria durante



horas o incluso días, provocando pérdidas económicas importantes en términos de costos de producción y mantenimiento [3].

En los procesos de fabricación actuales, es muy importante contar con una estrategia de mantenimiento buena y económica para garantizar la confiabilidad del proceso. En este sentido, la clave para mejorar los programas de mantenimiento es el conocimiento inmediato del estado del motor y los medios necesarios para poder emitir alarmas preventivas antes de que se produzca un fallo que lo deje inservible. Los motores asíncronos que más fallas presentan son los pequeños [4].

La presencia de velocidades críticas en sistema roto-dinámico permite llevar a cabo análisis dinámicos adecuados y balanceos del rotor para evitar alteraciones de funcionamiento anormal. La determinación del desequilibrio provocado por la presencia de velocidades críticas, ocasiona desequilibrios como lo es la resonancia [5].

Un problema presente en los motores asíncronos con tamaños IEC 71 a 112 con potencias desde $\frac{3}{4}$ hasta $7\frac{1}{2}$ cv, es la vibración, cuando esta sale de los parámetros de operación. Este incremento genera daños a algún componente que integra el sistema roto-dinámico, exclusivamente en los elementos mecánicos, reduciendo su vida útil. Cerca del 40 % de las fallas se deben a una avería del rotor por efectos de la vibración [6].

El arranque de motores asíncronos a tensión plena o el cambio de velocidades trae inmersos comportamientos físicos asociados a la vibración. Estos fenómenos se controlan para evitar resonancias, que en muchos de los casos incrementan los fallos en los componentes mecánicos [7].

Al estudiar las fallas en motores eléctricos se reducen los costes por mantenimiento, los cuales están asociados a paradas no programadas. El incremento de propuestas de monitoreo, con aplicaciones de tecnología 4.0 es una buena opción, sin embargo, su desventaja es el costo que representa al requerir una gran cantidad de sensores y software, además del nivel de especialización del grupo de mantenimiento [8, 9].

Los motores asíncronos se encuentran en la mayoría de los procesos industriales. Como cualquier componente mecánico, estos motores están sujetos a fallas, o reducción de su ciclo de vida. Debido a que las inspecciones y reparaciones son costosas, es necesario monitorear su condición aplicando equipos de vibraciones mecánicas para detectar defectos de manera no intrusiva (es decir, sin interferir con su operación) [10].

Diferentes autores han estudiado las fallas de los motores asíncronos, tales como la excentricidad estática (también conocida como dinámica del entrehierro), el comportamiento rotacional de los rodamientos, y la fractura de las barras o anillos del rotor [11, 12, 13].

Los motores asíncronos o de inducción (AC) de corriente alterna, como el estudiado en este trabajo, son los caballos de trabajo de la industria moderna debido a su robustez, bajo costo, relativa simplicidad y eficiencia. Se aplican en todos los sectores industriales.



El objetivo de esta investigación es analizar las fallas en los rotores de motores asíncronos, específicamente en torno a la velocidad crítica del sistema. Para ello, se utilizó un equipo de vibraciones mecánicas que permitió la determinación de las bandas laterales de la componente principal (o fundamental) de la vibración. Este enfoque responde a la siguiente pregunta de investigación clave:

¿Cómo se pueden identificar y controlar las velocidades críticas y los fenómenos de resonancia en un motor asíncrono trifásico con variación de velocidad, mediante el análisis dinámico de su rotor, para prevenir vibraciones excesivas, fallos mecánicos y mejorar su eficiencia operativa?

Para responder a esta pregunta, el estudio se llevó a cabo aplicando una metodología mixta que integra modelado teórico-simulación y validación experimental.

El desbalance en un rotor puede incrementar el consumo de energía eléctrica entre el 1 % y el 5 % a causa de las vibraciones. Este consumo se reduce notablemente al evitar la operación continua en las velocidades críticas del sistema [12].

Adicionalmente, las paradas no programadas por reparaciones consumen energía extra en los procesos de re arranque y sincronización. Se ha comprobado que un motor que opera eficientemente y sin interrupciones ahorra hasta un 2 % de energía anual al eliminar los ciclos de arranque inestables. En términos generales, los motores que cuentan con un mantenimiento adecuado consumen hasta un 5 % menos de energía en comparación con aquellos sin una gestión de mantenimiento correcta [3].

MATERIALES Y MÉTODOS

Rotor

El motor empleado para este estudio es un motor trifásico de la marca Siemens, compuesto por el rotor, el cual se considera para este análisis como un elemento lineal. Este rotor se dividió en tres secciones, como se observa en la Figura 1, para que, al ejecutar la simulación, pueda ser estudiado mediante coordenadas de desplazamiento en las direcciones "x ,y"; interviniendo los módulos de rigidez y amortiguamiento de cada rodamiento. Los rodamientos, ubicados en las estaciones 1 y 3, permiten analizar el comportamiento de la velocidad de rotación, al inducir un desbalance en la sección 3, se genera un movimiento anormal, lo que provoca alteraciones en la operación del rotor o desequilibrio de funcionamiento, creando una amplitud máxima en la estación 3. Se analiza la amplitud máxima generada en cada estación, la velocidad en RPM y el ángulo de fase en grados, lo que permite conocer su ubicación y la frecuencia forzada, conocida como resonancia. Los coeficientes de rigidez y amortiguamiento proporcionan al sistema estabilidad, permitiendo que la fuerza de excitación pase lentamente por la frecuencia natural sin ocasionar daño al motor.

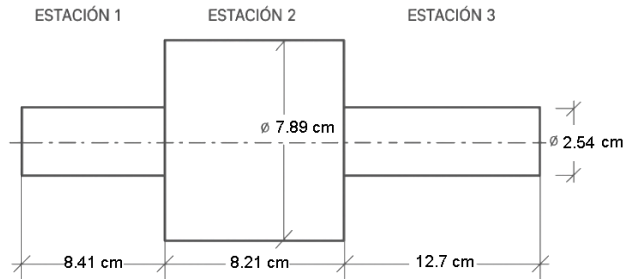


FIGURA 1. Rotor seccionado.

El movimiento orbital del rotor ocurre en el plano (x, y) , como se ilustra en la Figura 2. Este sistema se modela con dos grados de libertad, definidos por los coeficientes de rigidez y amortiguamiento en el eje: (k_x, c_x) y (k_y, c_y) , respectivamente. La masa del rotor (m) se sitúa en este mismo plano (x, y) . Cuando esta masa es excitada por la fuerza radial (F), también conocida como fuerza de rotación o desbalance, se manifiesta la flexibilidad y el amortiguamiento en los rodamientos del rotor. Este fenómeno es generado principalmente por los rodamientos, cuyos efectos son representados en el modelo por los coeficientes (k_x, c_x) y (k_y, c_y) . Estas coordenadas modelan una rotación en el plano (x, y) que considera la rigidez del sistema en la rotación radial y el amortiguamiento generado por las características de viscosidad de los lubricantes.

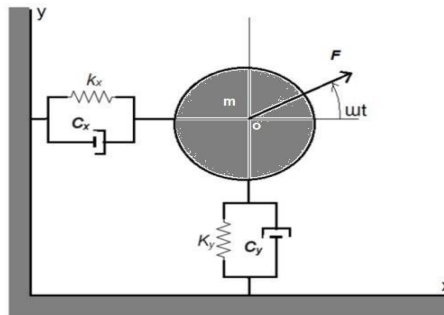


FIGURA 2. Rigidez y amortiguamiento del rotor.

Coefficientes de rigidez y amortiguamiento

Los coeficientes de rigidez y amortiguamiento del rodamiento son ocho para el sistema coordenado $"x, y"$. Los coeficientes de rigidez están representados por la letra $"k"$, siendo estos los movimientos dinámicos, correspondientes a la rigidez del resorte en forma radial. El amortiguamiento es la parte que resiste la velocidad en el plano radial, representado por la letra $"c"$. En los rodamientos se presentan las fuentes de no linealidad o fuerzas de reacción, siendo ocho los coeficientes que intervienen en el fenómeno de respuesta al desbalance y estabilidad del rotor. Los valores de viscosidad del lubricante y la velocidad de giro dan lugar a la rigidez de los rodamientos y su respectivo amortiguamiento, y se calculan a partir de:



$$\underline{k}_{ij} = \frac{k_{ij}C}{W} \quad (1)$$

$$\underline{C}_{ij} = \frac{C_{ij}C}{W} \quad (2)$$

$$k_{ij} = -\frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$C_{ij} = -\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}_j} \quad (4)$$

Donde:

C = Claro radial = $\frac{\omega}{2\pi} = 0.24$

ω = Velocidad angular (rad/seg)

W = Carga estática (lb)

k_{ij} = Coeficiente de rigidez del rodamiento

C_{ij} = Coeficiente de amortiguamiento

Para calcular los coeficientes de rigidez y amortiguamiento, se presentan las siguientes ecuaciones:

$$-k_{xx} = \frac{\partial F_x}{\partial x} \cong \frac{\Delta F_x}{\Delta x} = \frac{F_x(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_x(x, y, 0, 0)}{\Delta x} \quad (5)$$

$$-k_{yx} = \frac{\partial F_y}{\partial x} \cong \frac{\Delta F_y}{\Delta x} = \frac{F_y(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_y(x, y, 0, 0)}{\Delta x} \quad (6)$$

$$-k_{xy} = \frac{\partial F_x}{\partial y} \cong \frac{\Delta F_x}{\Delta y} = \frac{F_x(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_x(x, y, 0, 0)}{\Delta y} \quad (7)$$

$$-k_{yy} = \frac{\partial F_y}{\partial y} \cong \frac{\Delta F_y}{\Delta y} = \frac{F_y(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_y(x, y, 0, 0)}{\Delta y} \quad (8)$$

$$-C_{xx} = \frac{\partial F_x}{\partial \dot{x}} \cong \frac{\Delta F_x}{\Delta \dot{x}} = \frac{F_x(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_x(x, y, 0, 0)}{\Delta \dot{x}} \quad (9)$$

$$-C_{yx} = \frac{\partial F_y}{\partial \dot{x}} \cong \frac{\Delta F_y}{\Delta \dot{x}} = \frac{F_y(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_y(x, y, 0, 0)}{\Delta \dot{x}} \quad (10)$$

$$-C_{xy} = \frac{\partial F_x}{\partial \dot{y}} \cong \frac{\Delta F_x}{\Delta \dot{y}} = \frac{F_x(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_x(x, y, 0, 0)}{\Delta \dot{y}} \quad (11)$$



$$-C_{yy} = \frac{\partial F_y}{\partial \dot{y}} \cong \frac{\Delta F_y}{\Delta \dot{y}} = \frac{F_y(x + \Delta x, y, 0, 0) - F_y(x, y, 0, 0)}{\Delta \dot{y}} \quad (12)$$

Donde:

- k_{xx}, k_{yy} = Componentes de rigidez
- C_{xx}, C_{yy} = Coeficientes de amortiguamiento
- K_{xy}, K_{yx} = Coeficientes de rigidez que interconectan el sistema
- C_{xy}, C_{yx} = Coeficientes de amortiguamiento que interconectan el sistema

Lubricación de rodamientos

La lubricación de los rodamientos para cargas radiales con un film de película fluida se calcula a partir de los movimientos dinámicos entre el rodamiento y la flecha, o de las posiciones de cada componente de la velocidad.

El amortiguamiento que proporciona el lubricante permite separar los metales en movimiento durante su funcionamiento. Los lubricantes poseen una viscosidad determinada por sus propiedades físicas y químicas, la cual puede verse afectada por altas temperaturas o por la presión en los puntos de contacto. Sin embargo, si el lubricante presenta un buen amortiguamiento, podrá mantener su eficacia en condiciones de operación exigentes.

Los efectos provocados por la viscosidad del lubricante predominan en comparación con los efectos de la inercia del fluido. Por lo tanto, las reacciones en estado de equilibrio estático de las componentes "x, y" del movimiento dinámico se expresan de la siguiente manera:

$$F_x + W_x = f_x = \frac{\partial F_x}{\partial x} x + \frac{\partial F_x}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial F_x}{\partial x} y + \frac{\partial F_x}{\partial \dot{x}} \dot{y} \quad (13)$$

$$F_y + W_y = f_y = \frac{\partial F_y}{\partial x} x + \frac{\partial F_y}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial F_y}{\partial x} y + \frac{\partial F_y}{\partial \dot{x}} \dot{y} \quad (14)$$

Donde:

$F_x = F_x(x, y, \dot{x}, \dot{y})$ y $F_y = F_y(x, y, \dot{x}, \dot{y})$ son las componentes vectoriales de la fuerza del rotor sobre el rodamiento, en equilibrio estático.

W_x y W_y son las componentes vectoriales de la carga estática.

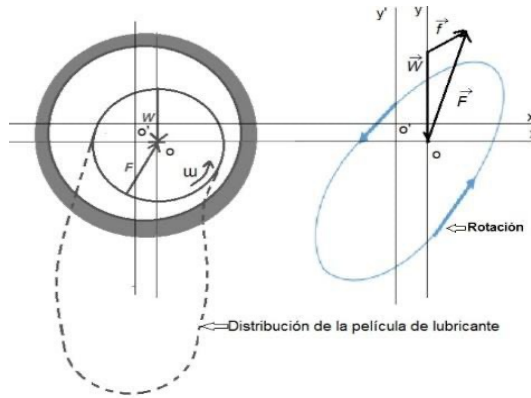


FIGURA 3. Movimiento de rotación del rotor en el rodamiento.

OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO

Los coeficientes de rigidez y amortiguamiento se obtienen mediante la aplicación de la ecuación (15) utilizando el programa MATLAB. Para el desarrollo del cómputo numérico se consideró el sistema rotor–rodamiento como un sistema circular, incorporando las variables de aceleración, velocidad de rotación y desplazamiento en la solución de la matriz de transferencia. De este modo, se determinan la magnitud y la dirección de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento, minimizando la vibración del sistema. En este modelado, la viscosidad del lubricante se considera uniforme.

El sistema para el cálculo de los coeficientes se considera sencillo, dividiendo el sistema en tres estaciones o secciones, cada una con su matriz respectiva, cuya geometría se toma en cuenta, así como su elasticidad y su masa, aplicando el sistema matricial, como:

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = f(t) \quad (15)$$

Donde:

- M** = Matriz de la masa
- \ddot{X} = Aceleración del sistema
- C** = Matriz de amortiguamiento
- \dot{X} = Velocidad de rotación
- K** = Matriz de rigidez
- X** = Desplazamiento
- f** = Función de fuerza con respecto al tiempo

Los coeficientes calculados, K_{xx} , K_{yy} , son denominados como coeficientes de rigidez, los, C_{xx} , C_{yy} , coeficientes de amortiguamiento, mientras que K_{xy} , K_{yx} , C_{xy} , C_{yx} son los coeficientes de acoplamiento cruzados. Debido a la reacción que presentan ante una velocidad y un desplazamiento, al aplicarse una fuerza o carga, los coeficientes obtenidos se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. Coeficientes de rigidez y amortiguamiento.

K_{xx}	K_{yy}	C_{xx}	C_{yy}	K_{xy}	K_{yx}	C_{xy}	C_{yx}
43.0	10	4.0	2.0	22.0	3.0	3.0	1.0

Análisis dinámico del rotor

Se realiza la simulación de respuesta al desbalance en estado estable, con el software, Rotor Dynamics Analysis [14], para el rotor mostrado en la Figura 1. Este tiene un movimiento en una órbita a partir del radio de giro del rotor. Se toman en cuenta las posiciones de los rodamientos debido a la concentración del momento polar de inercia que ocurre en cada uno de ellos. Los datos correspondientes al rotor para realizar la simulación se presentan en la Tabla 2. Los diámetros internos se consideran "0", por tratarse de una flecha maciza, y se requiere el largo de cada sección.

TABLA 2. Dimensiones del rotor.

N.º de Estación	Diámetro interior (cm)	Diámetro exterior (cm)	Largo (cm)
Estación 1	0	2.54	8.214868
Estación 2	2.54	7.897622	8.41
Estación 3	0	2.54	12.7

Para aplicar el software Rotor Dynamics Analysis "RDA" se tomaron en cuenta los valores dimensionales del rotor, como son: diámetro interior, exterior y el largo, mostrados en la Tabla 2, así como los datos de la Tabla 3 para cada estación, estos datos son indispensables para llevar a cabo el cálculo de los valores de amplitud y ángulo de fase " φ " para el eje en las direcciones X y Y.

TABLA 3. Datos adicionales para la simulación.

Módulo de elasticidad "E" (kg/cm ²)	2.1E+07
Densidad del acero (kg/cm ³)	0,00785
Velocidad de operación (RPM)	3600

Análisis de vibraciones

Se realizó un análisis con el equipo analizador de vibraciones CSI 2130, estabilizando la velocidad de rotación del motor, cercana a las revoluciones donde se presentaron las amplitudes máximas calculadas en el modelado.

RESULTADOS

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos al modelar el sistema. La tabla muestra una velocidad de 2 000 rpm, por ser la máxima velocidad en que se encuentran ubicadas las inestabilidades del sistema rotor. Se observa que, a una velocidad aproximada de 800 rpm, en la dirección Y, ocurre una inestabilidad de 17.20 μm , con un ángulo de fase de 90.7°. La segunda inestabilidad se presenta a las 1 600 rpm, cuya estabilidad es 17.45 μm con un ángulo de fase de 90.4°.

TABLA 4. Resultados de la respuesta del rotor estación 2.

Velocidad RPM	Dirección X		Dirección Y	
	Amplitud μm	Ángulo de fase (φ)	Amplitud μm	Ángulo de fase (φ)
100	0.15	-55.9	19.87	99.7
200	0.38	-72.7	15.77	92.2
300	0.58	-79.2	16.18	92.2
400	0.76	-83.1	16.10	91.3
500	0.97	-85.7	16.28	91.2
600	1.17	-87.7	16.43	90.7
700	1.35	-89.3	16.48	90.8
800	1.55	-90.6	17.20	90.9
900	1.75	-91.9	16.15	90.6
1000	1.93	-93	16.13	90.6
1100	2.13	-94	16.10	90.5
1200	2.31	-95	16.10	90.5
1300	2.51	-95.9	16.18	90.5
1400	2.69	-96.8	16.05	90.4
1500	2.87	-97.6	16.13	90.4
1600	3.07	-98.5	17.45	90.4
1700	3.25	-99.3	16.10	90.4
1800	3.43	-100	16.13	90.4
1900	3.61	-100.8	16.13	90.4
2000	3.78	-101.6	16.13	90.4

La Figura 4 muestra las velocidades críticas al ejecutar el cálculo de respuesta al desbalance. La primera velocidad se encuentra ubicada a las 800 rpm y la segunda a 1 600 rpm. Para los dos puntos, mostrados en la Figura 4, se observa que la amplitud mostrada provoca resonancias forzadas o inestabilidades. Este análisis se puede aplicar para determinar los coeficientes que permiten equilibrar un sistema real para balanceo de rotores.

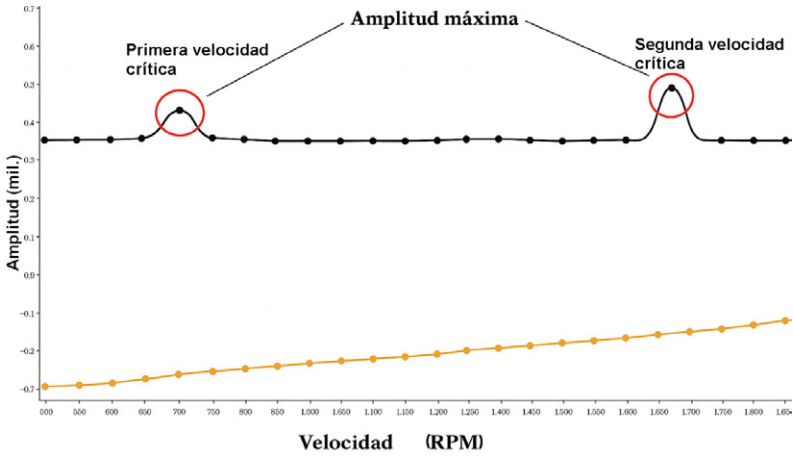


FIGURA 4. Inestabilidad del rotor.

Los resultados en estado estacionario de los dos rodamientos con características idénticas, ubicados en las estaciones 1 y 3 que soportan al rotor en condiciones reales, se muestran en los gráficos de la Figura 5. En ellos se presentan los ángulos de fase en las direcciones X e Y, a partir de los cuales se obtiene el movimiento orbital de las coordenadas de posición del centro de masa. Esto permite visualizar la trayectoria orbital de la vibración del rotor causada por el desbalance, el cual genera condiciones de inestabilidad en el sistema. Los ángulos de fase graficados son los que se muestran en la Tabla 4.

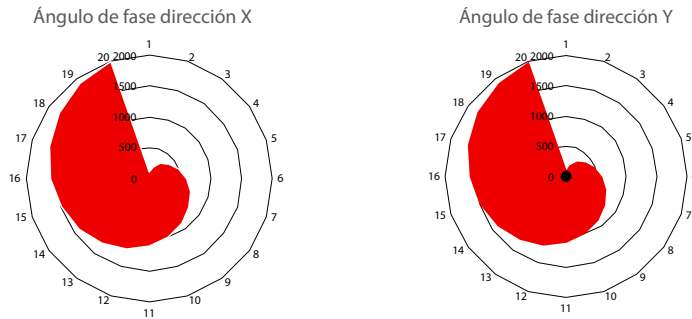


FIGURA 5. Diagrama de ángulos de fase.

El análisis de vibraciones se realizó con el equipo CSI 2130, a una velocidad programada de 800 rpm. En el gráfico de la Figura 6 se observa que los picos dominantes se presentan a 750, 1500, 2250 y 3000 rpm. La amplitud máxima se registra a 750 rpm, lo que indica la presencia de una resonancia mecánica en ese punto, conocida como velocidad crítica.

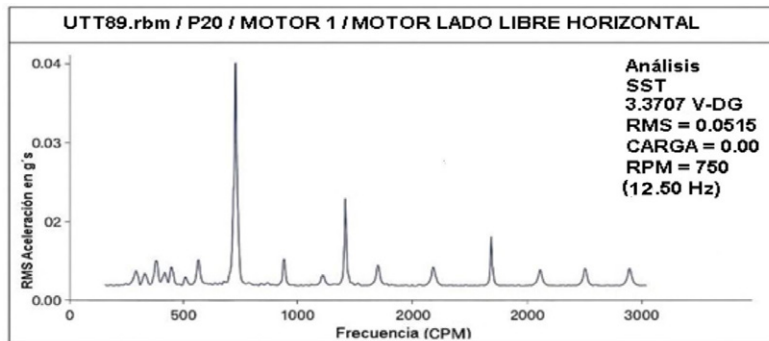


FIGURA 6. Movimiento de rotación del rotor en el rodamiento.

El segundo análisis, mostrado en la Figura 7, se realizó a una velocidad fundamental de 1 500 rpm. En los resultados se observa que la velocidad crítica se encuentra por encima de este valor, ubicándose alrededor de 1 600 rpm. Esto indica que, para fines de protección y operación segura del sistema, la segunda velocidad crítica representa un punto crítico, debido a los efectos de inestabilidad o resonancia que podría generar.

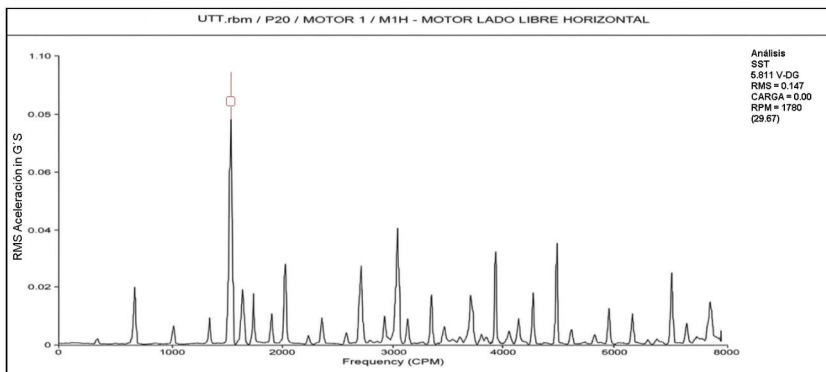


FIGURA 7. Movimiento de rotación del rotor en el rodamiento estación 3.

DISCUSIÓN

Este trabajo presenta un análisis integral del comportamiento dinámico de un rotor de motor asíncrono operando a velocidades variables, con el objetivo de identificar y caracterizar sus velocidades críticas para mitigar fenómenos de resonancia. Nuestros hallazgos no solo validan el modelo teórico propuesto mediante datos experimentales, sino que también subrayan implicaciones significativas para la gestión de activos y la eficiencia energética en entornos industriales. El eje de nuestra metodología reside en la modelización del sistema rotor-rodamientos mediante un enfoque de elementos finitos, considerando una matriz con las variables de coeficientes de rigidez y amortiguamiento.



La principal contribución de este trabajo va más allá de la identificación de las velocidades críticas: proporciona un marco cuantitativo para la toma de decisiones operativas. La posibilidad de predecir con exactitud estas velocidades permite implementar estrategias de control que eviten la operación prolongada en estos regímenes, por ejemplo, mediante la programación de variadores de frecuencia para acelerar rápidamente a través de estas bandas críticas.

Sin embargo, es necesario contextualizar las limitaciones de nuestro modelo para orientar futuras investigaciones.

Finalmente, nuestros resultados aportan datos obtenidos entre el modelado físico y la monitorización basada en condición. La correlación exitosa entre la simulación y los datos del analizador de vibraciones sienta las bases para desarrollar sistemas de vigilancia más inteligentes.

El estudio del desequilibrio en motores asíncronos permite obtener mejoras en la eficiencia energética del orden del 6 % al 10 %, principalmente al evitar la operación en velocidades críticas que provocan resonancias. Además, contribuye a la reducción de pérdidas por vibración y fricción, y a la optimización del mantenimiento predictivo, permitiendo que el sistema opere en condiciones ideales.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se concluye que, al operar el sistema a una velocidad de 3 600 rpm, se identifican la primera velocidad crítica, con una amplitud de 17.20 μm , y la segunda velocidad crítica, con una amplitud de 17.45 μm . Asimismo, se obtuvieron los ángulos de fase para cada velocidad crítica en las direcciones X e Y, lo que permitió determinar el movimiento del rotor soportado por los rodamientos.

Se obtuvieron la primera y segunda velocidad crítica al aplicar un desbalance; estos resultados son muy importantes ya que proporcionan datos del comportamiento dinámico del rotor soportado por dos rodamientos de bolas, con sus respectivos coeficientes de rigidez y amortiguamiento. El análisis de respuesta al desbalance permite tener en cuenta sus resultados a la hora de variar la velocidad para procesos de fabricación o procesos industriales.

En los análisis prácticos, la segunda velocidad crítica se presentó a las 1 600 rpm, por ser este el punto en donde se presenta el mayor riesgo al motor, debido a inestabilidades o resonancias. Este rotor es considerado, por la velocidad de trabajo, como flexible.

Los resultados de este trabajo indican que, por cualquier método de variación, es necesario evitar las velocidades críticas para prevenir vibraciones excesivas o algún fallo, o condición insegura de trabajo.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Universidad Tecnológica de Tlaxcala, por las facilidades para realizar los análisis en el laboratorio de mantenimiento predictivo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

José Luis Hernández Corona: conceptualización inicial de la investigación, identificación de la metodología y su desarrollo, análisis de datos, validación de resultados, preparación de borradores originales y edición.

Jonny Carmona Reyes: curación de datos y su validación, redacción y validación.

Román Daniel Romero Mitre: conceptualización, redacción y preparación de borrador original.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Para este trabajo no se utilizó ninguna herramienta de IA.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos generados y analizados en este estudio se incluyen en el artículo publicado. No se generaron conjuntos de datos adicionales para su difusión pública.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos que no existe conflicto de interés en el desarrollo de este trabajo que presentamos para su evaluación y procesos subsecuentes.

REFERENCIAS

- [1] Quisilema-Quiñaluiza, J. F. (2021). Análisis de la estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia por el método de Runge-Kutta. *Revista Vinculos*, 18(1), 64–71. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/15360>
- [2] González, D. G. D., Fernández, J. G., & Barbón, A. (2002). *Variación de la velocidad de los motores eléctricos*. Universidad de Oviedo. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:171700058>
- [3] Muñoz-Cevallos, J. L., & Macías, M. C. (2021). Mantenimiento centrado en la confiabilidad a equipos en industria de conservas de atún. *Científica*, 25(2), 1-12. <https://cientifica-ipn.com/index.php/esime/article/view/64>
- [4] García, M. V. (2016). *Determinación paramétrica y operación de un motor de CA de rotor devanado como transformador* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio del Instituto Politécnico Nacional.
- [5] Vílchez Rojas, B. J. (2021). *Estudio y análisis comparativo de un motor de inducción trifásico con modelos aproximados y exactos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7599>
- [6] Cárdenas, I. F. A., & Collaguazo, T. E. P. (2019). *Desarrollo de una balaceadora electrónica para rotores de motores eléctricos para la empresa Siproelectrik SA* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17645/1/UPS-ST004237.pdf>
- [7] Romero, J. A. C., & Boyacá, J. A. R. (2013). El variador de velocidad como método de arranque ideal para motores eléctricos de inducción. *Ingeniería Investigación y Desarrollo:12+D*, 13(1), 34. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/3414/3054
- [8] Bossio, G. R., De Angelo, C. H., & García, G. O. (1-3 de septiembre de 2008). *Evaluación de los armónicos de corriente para el diagnóstico de barras rotas en motores de inducción*. Ponencia presentada en el XXI Congreso Argentino de Control Automático, Argentina. https://www.researchgate.net/publication/233382293_Evaluacion_de_los_Armonicos_de_Corriente_para_el_Diagnostico_de_Barras_Rotas_en_Motores_de_Induccion
- [9] Penman, J., Sedding, H. G., Lloyd, B. A., & Fink, W. T. (2002). Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE transactions on Energy conversion*, 9(4), 652-658. <https://doi.org/10.1109/60.368345>
- [10] Arthur, N., & Penman, J. (2002). Induction machine condition monitoring with higher order spectra. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5), 1031-1041. <https://ieeexplore.ieee.org/document/723030>
- [11] Mendes, D. S. F. T., Navas, H. V. G., & Charrúa-Santos, F. M. B. (2022). Proposal for a maintenance management system based on the lean philosophy and industry 4.0. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 8(1), e587-e587. <https://doi.org/10.32358/rpd.2022.v8.587>
- [12] Nandi, S., Toliyat, H., & Li, X. (2005). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors: A Review. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 20(4), 719-729. <https://doi.org/10.1109/tec.2005.847955>
- [13] Bossio, G. R., De Angelo, C. H., & De Pauli, A. D. (2005). *Diagnóstico de fallas en el rotor de motores de inducción caso de estudio: motor de 1.6 MW de bomba de alta presión*. XI Reunión de Trabajo en Procedimiento de la Información y Control, pp. 488-493. https://www.researchgate.net/publication/233382306_Diagnostico_de_Fallas_En_el_Rotor_de_Motores_de_Induccion_Caso_de_Estudio_Motor_de_16_MW_de_Bomba_de_Alta_Presion
- [14] Adams, M. L. (2009). *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*. CRC Press.

Efecto del aceite esencial de orégano y ozonización como alternativa para la prolongación del tiempo de vida útil en fréjol cocido. (*Phaseolus vulgaris* L.)

Adriana Geovanna Yanchaliquín Yanchaliquín^{1*}, Renato Agustín Romero Corral¹

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.

*Autor para correspondencia/Corresponding author: renato.romero2483@utc.edu.ec

Effect of oregano essential oil and ozonation as an alternative for shelf-life extension in cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.)

Resumen

El estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de combinar aceite esencial de orégano (AEO) y ozono para extender la vida útil del fréjol cocido (*Phaseolus vulgaris* L.), bajo un diseño factorial AxB: un testigo (T0), y cuatro combinaciones de ozono (0.25 y 0.50 ppm), con AEO (0.30 % y 0.50 %), durante 21 días de almacenamiento a 4 °C. Los fréjoles fueron hidratados (3:1 agua: grano), cocidos 90 minutos, enfriados con agua ozonizada, recubiertos con AEO emulsificador en Tween 80 al 0.5 % y envasados en fundas de poliamida y polietileno. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos (pH y acidez), microbiológicos (aerobios mesófilos, coliformes totales, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella spp.*), y sensoriales (color, olor, sabor, textura y aceptabilidad). Se aplicaron ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0.05$). Hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$), entre tratamientos y testigo durante el almacenamiento. T3 presentó la menor acidez (0.08 g/100 g), y el testigo la mayor (0.17 g/100 g). T0, T1 y T2 mantuvieron pH ligeramente ácido (5.2–5.5), mientras que T3 y T4 superaron pH 7.0. T3 logró la mayor reducción microbiana en aerobios mesófilos (1.37 log₁₀ UFC/g), y coliformes totales (2.60 log₁₀ UFC/g), diferenciándose significativamente del testigo. Sensorialmente, T3 obtuvo las puntuaciones más altas en todos los atributos hasta el día 21. Se concluye que la aplicación conjunta de ozono y AEO, especialmente en T3, representa una alternativa tecnológica viable y eficaz para preservar la calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial del fréjol cocido.

Palabras clave: aceite esencial de orégano, ozonización, calidad sensorial, fréjol cocido.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the efficacy of combining oregano essential oil (AOE), and ozone in extending the shelf life of cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.), using an AxB factorial design: a control (T0), and four combinations of ozone (0.25 and 0.50 ppm), with AOE (0.30 % and 0.50 %), for 21 days of storage at 4°C. The beans were hydrated (3:1 water: bean), cooked for 90 minutes, cooled with ozonated water, coated with AOE emulsifier in 0.5 % Tween 80, and packaged in polyamide and polyethylene bags. Physicochemical parameters (pH and acidity), microbiological parameters (mesophilic



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
12/03/2025

Aceptado /
Accepted:
02/06/2025

Publicado en línea /
Published online:
15/05/2026



aerobes, total coliformes, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella* spp.), and sensory attributes (color, odor, flavor, texture, and acceptability) were evaluated. ANOVA and Tukey's test were applied ($p < 0.05$). There were statistically significant differences ($p < 0.001$), between treatments and control during storage. T3 presented the lowest acidity (0.08 g/100 g), and the control the highest (0.17 g/100 g). T0, T1 and T2 maintained slightly acidic pH (5.2–5.5), T3 and T4 exceeded pH 7.0. T3 achieved the greatest microbial reduction in mesophilic aerobes (1.37 \log_{10} CFU/g), and total coliforms (2.60 \log_{10} CFU/g), differing significantly from the control. Sensorially, T3 obtained the highest scores in all attributes until day 21. It is concluded that the joint application of ozone and AEO, especially in T3, represents a viable and effective technological alternative to preserve the physicochemical, microbiological and sensory quality of cooked beans.

Keywords: oregano essential oil, ozonization, sensory quality, cooked beans.

INTRODUCCIÓN

Prolongar el tiempo de vida útil de un alimento procesado es importante para garantizar el abastecimiento de productos de calidad, la reducción de residuos, el aporte a la seguridad alimentaria, la mejora la eficiencia de la cadena de suministro y el mejoramiento de la viabilidad económica al abrir nuevos segmentos de consumo [1] La vida útil de los alimentos procesados se ve influenciada por una combinación de factores, entre los que destacan las condiciones de almacenamiento, los materiales de envase, el proceso y la naturaleza bioquímica del alimento [2]. Es importante considerar que el deterioro de las características sensoriales inicia desde la cosecha y continúa durante el procesamiento y almacenamiento; esto se debe a los cambios químicos y físicos que ocurren a lo largo del tiempo [3]

El fréjol cocido (*Phaseolus vulgaris* L.), es un producto alimenticio que ha ganado popularidad en Ecuador y constituye un elemento fundamental en la alimentación, destacado por sus beneficios nutricionales y para la salud, debido a que posee propiedades antioxidantes, anticancerígenas y antiinflamatorias gracias a su contenido en fitoquímicos [4]. Se caracterizan por su riqueza en proteínas, fibra, vitaminas y minerales, y además es una fuente sobresaliente de carbohidratos y micronutrientes esenciales como hierro y zinc [5], lo que los convierte en un ingrediente esencial en las cocinas del mundo. La forma de cocción tiene una influencia significativa en su perfil nutricional, digestibilidad y composición fitoquímica. El proceso de cocción implica cambios bioquímicos complejos, incluyendo modificaciones de la pared celular y absorción de agua, que son cruciales para conseguir la textura deseada [4]. El tiempo de cocción varía significativamente en función de varios factores: como el genotipo o las condiciones de almacenamiento [6].

Dado que la cocción del fréjol influye directamente en su calidad nutricional, es fundamental considerar estrategias que permitan conservar estas propiedades durante el almacenamiento. Los aceites esenciales, como el de orégano, destacan por sus propiedades bioactivas, que podrían ser utilizados como conservantes naturales, protegiendo al fréjol cocido de la degradación microbiológica y oxidativa. De igual manera, los aceites esenciales constituyen mezclas complejas de compuestos orgánicos



volátiles derivados del metabolismo secundario de las plantas [7], que pueden extraerse de diversas estructuras vegetales como flores, semillas, hojas, ramas, corteza y raíces [8], empleando diferentes métodos como la destilación por arrastre de vapor, la hidrodestilación o la extracción con solventes orgánicos [9]. Su composición química, caracterizada principalmente por terpenoides, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos, le confiere aromas distintivos y propiedades bioactivas significativas [10], mientras que su rendimiento, composición y concentración de metabolitos secundarios están influenciados por múltiples factores, incluyendo aspectos genéticos, geográficos y climáticos como el fotoperíodo, la altitud, la época de cosecha, la etapa de desarrollo, la temperatura, el estrés hídrico y la composición del suelo [11], así como por el origen, método de extracción y parte específica de la planta utilizada [12].

El aceite esencial de orégano contiene principalmente terpenos como; el timol y carvacrol [13], lo que le concede un potente espectro bactericida y una destacada acción antimicrobiana contra hongos y levaduras, [14]. Estos aceites han demostrado propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antivirales [15], y ofrecen ventajas como: ausencia de residuos perjudiciales, baja probabilidad de desarrollo de resistencia, reducida fitotoxicidad y un perfil de seguridad favorable para organismos mamíferos [16]. Han sido reconocidos como seguros por los departamentos de seguridad alimentaria de distintos países, como es el caso de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EE. UU. (FDA) [17]. Sin embargo, su implementación práctica puede verse limitada por su intenso aroma y la necesidad de desarrollar sistemas de liberación controlada efectivos para mantener su actividad durante períodos prolongados [18].

El ozono (O_3) es una técnica de conservación de alimentos no térmica, considerada una alternativa segura y respetuosa con el medio ambiente. Se caracteriza por ser un potente desinfectante, pero sin los efectos residuales o daños asociados al uso de desinfectantes químicos convencionales y es capaz de responder a la aceptación de los consumidores, las expectativas de la industria alimentaria y los requisitos de las agencias reguladoras.

En junio de 2001, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) aprobó su uso tanto en fase gaseosa y acuosa como aditivo antimicrobiano para el contacto directo con alimentos, especialmente para frutas y hortalizas [19]. Su aplicación no afecta la calidad de los alimentos, aunque reacciona con algunos compuestos orgánicos. Los subproductos resultantes (aldehídos, cetonas o ácidos carboxílicos), son seguros para la salud humana. Además, su acción es rápida y no genera residuos perjudiciales en los alimentos, debido a su capacidad de autodescomposición, ya que se convierte de manera natural en oxígeno [20]. Por esta razón, el ozono no puede ser almacenado ni transportado; su generación debe realizarse en el lugar de uso [21].

La vida media del ozono es corta, normalmente entre 30 a 40 minutos en agua y 2 a 3 horas en aire, aunque estos parámetros pueden variar dependiendo de la temperatura y los valores de pH [22]. El ozono puede aplicarse tanto en fase gaseosa como acuosa, de forma continua o intermitente, adaptándose al tipo de producto y método de aplicación [23]. Aunque es relativamente estable en estado gaseoso, su inestabilidad en solución acuosa exige un control preciso durante su uso [24]. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto combinado de ozono y aceite esencial de orégano sobre la calidad sensorial y microbiológica del fréjol cocido (*Phaseolus vulgaris* L.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los fréjoles utilizados en el estudio pertenecen a la variedad "bolón rojo", provenientes de los productores de Santa Teresa de Simiatug, Ecuador. La hidratación se realizó mediante remojo en agua a temperatura ambiente, en una proporción de 3:1 (agua: grano), durante 12 horas. La cocción se llevó a cabo conforme a lo establecido en la norma NTE INEN 1558:2013 (Ecuador), utilizando la misma proporción de 3:1 y manteniendo el grano en ebullición durante 90 minutos. Al finalizar, los fréjoles se enfriaron hasta alcanzar una temperatura de 20 °C.

La ozonización se realizó con un generador de ozono marca Tecnoisrael, en dosificaciones de 0.25 ppm y 0.5 ppm aplicadas en el agua del último enfriamiento hasta que la temperatura del producto alcanzara nuevamente los 20 °C. Posteriormente, se aplicó un revestimiento superficial con una solución compuesta por 0.5 % de Tween 80, aceite esencial de orégano en concentraciones de 0.30 % y 0.50 % y agua destilada [25].

Después de un oreado de 5 minutos para reducir el contenido de humedad superficial, se envasaron 300 g de producto en fundas de poliamida y polietileno de baja densidad, con un espesor de 90 micras. Las muestras fueron almacenadas en refrigeración a 4 °C, debidamente identificadas con su fecha de elaboración, para su evaluación posterior en intervalos de 7 días.

Las evaluaciones se realizaron mediante el método de análisis AOAC 982.12 para la medición de pH, tomando como referencia el pH de 5.5 a 5.7 de fréjol cocido. Para la realización del análisis microbiológico, se utilizaron placas de Petri films de aerobios, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp.*, Coliformes totales, *Escherichia coli*. Los análisis microbiológicos se realizaron siguiendo la Norma NTE INEN – Ecuador 1529-2 para control microbiológico de alimentos. La preparación de muestras implicó pesar 10 g de fréjol triturado, homogeneizado en 90 ml de agua peptonada estéril para obtener una dilución 1:10, realizando posteriormente diluciones seriadas para cada siembra. Se utilizaron métodos oficiales AOAC para diferentes microorganismos: método AOAC 990.12 para recuento de aerobios mesófilos, AOAC 991.14 para *Escherichia coli*/coliformes y AOAC 2003.07 para *Staphylococcus aureus*.

La técnica de Petrifilm® se aplicó en todas las determinaciones, sembrando 1 ml de muestra por placa, incubando bajo condiciones específicas: aerobios mesófilos a 35 °C ± 1 °C por 48 ± 3 horas, coliformes a 35 °C ± 1 °C por 24 horas, *Escherichia coli* a 35 °C ± 1 °C por 48 horas y *Staphylococcus aureus* a 37 °C ± 1 °C por 24 horas. La identificación de colonias se realizó según los criterios de cada microorganismo: colonias rojas y azules con gas para coliformes totales, colonias azules con gas para *Escherichia coli* y colonias rojo violeta para *Staphylococcus aureus*. El análisis de *Salmonella spp.* se realizó mediante el método SEM-SS (AOAC 967.25 / 967.26 / 967.27). Para la interpretación de los resultados microbiológicos obtenidos, se tomó como referencia la Norma Técnica Sanitaria NTS No. 071 MINSA/DIGESA-V.01, la cual establece los criterios de calidad e inocuidad para alimentos preparados con tratamiento térmico. Esta normativa permitió evaluar la conformidad de las muestras con respecto a los límites microbiológicos aceptables en productos destinados al consumo humano.



La evaluación sensorial se realizó siguiendo la norma NTP ISO 8587:2008. Las pruebas se llevaron a cabo entre las 9:30 y 10:30 am con un panel semi-entrenado. A cada panelista se le asignó aleatoriamente un número de muestra y se le proporcionó un vaso de agua. Los panelistas evaluaron las muestras utilizando una escala hedónica de 5 puntos para los atributos de apariencia, color, olor, textura y sabor. La escala fue de 1 (malo), a 5 (excelente). Los resultados de las evaluaciones fueron recopilados para su posterior análisis.

Se aplicó un diseño factorial 2x2 para evaluar los efectos del nivel de ozono (0.25 ppm y 0.50 ppm), y la concentración de aceite esencial de orégano AEO (0.30% y 0.50%). Al combinar estos factores se generaron cuatro tratamientos experimentales: T1: 0.30 % AEO + 0.25 ppm ozono, T2: 0.30 % AEO +0.50 ppm ozono, T3: 0.50 % AEO +0.25 ppm ozono, T4: 0.50 % AEO +0.50 ppm ozono, y el tratamiento control (T0), sin tratar. Cada tratamiento se replicó tres veces (5 tratamientosx3 réplicas), lo que dio como resultado 60 unidades experimentales que fueron evaluadas en cuatro tiempos de almacenamiento (0,7,14 y 21 días).

Investigaciones previas han confirmado la actividad antimicrobiana del aceite esencial de orégano (*Origanum vulgare*) frente a diversos microorganismos. Estos estudios, analizados mediante ANOVA con un nivel de significancia de $p < 0.05$, reportaron un efecto inhibitorio sobre *Staphylococcus* en carne de pollo [26], así como su acción frente a *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* [27], y su influencia en la supervivencia de *Staphylococcus aureus* y especies de *Salmonella spp.* en carne de cerdo [28]. En función de estos antecedentes, en el presente estudio se empleó la misma metodología estadística utilizando el software Statgraphics Centurion, versión 19.

RESULTADOS

En productos cocidos, la acidez tiende a incrementarse durante el almacenamiento como resultado de la producción de ácidos orgánicos por la actividad microbiana como se observa en la Figura 1.

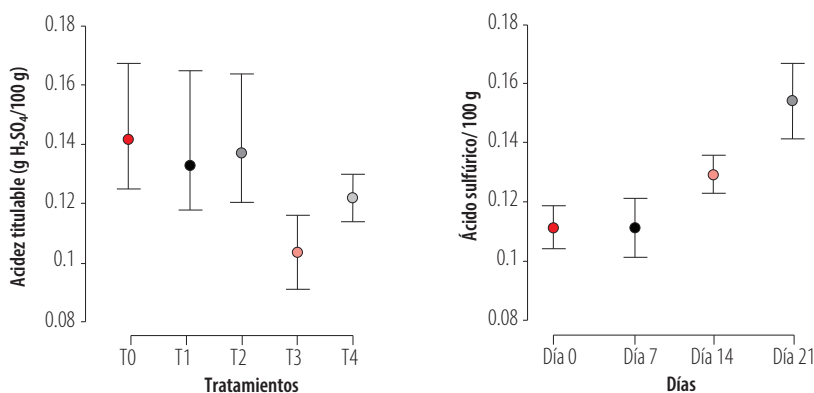


FIGURA 1. Acidez titulable del fréjol cocido (g H₂SO₄/100 g): (a) por tratamiento; (b) por tiempo de almacenamiento (días 0/1, 7, 14 y 21).

El análisis de varianza (ANOVA) demostró que la acidez tuvo un aumento progresivo y estadísticamente significativo a lo largo del tiempo de almacenamiento ($p < 0.001$). Al comparar los tratamientos individualmente, la prueba post-hoc de Tukey reveló que el Tratamiento T3 mostró una reducción significativa de la acidez en comparación con el tratamiento testigo (T0), ($p < 0.001$), como se observa en la Figura 1. Este hallazgo confirma que T3 fue el más efectivo en el control de este atributo, ya que mantuvo niveles de acidez significativamente menores ($p < 0.05$) durante todo el periodo de 21 días de almacenamiento.

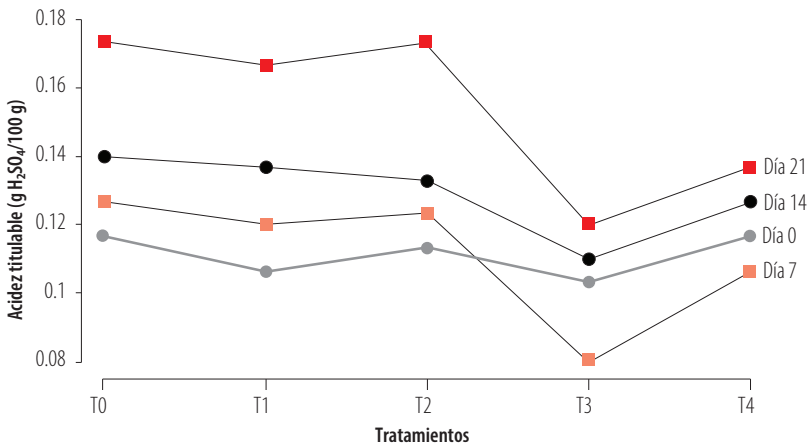


FIGURA 2. Interacción entre concentración de AEO (%) y ozono (ppm) sobre la acidez titulable (g H₂SO₄/100 g) del fréjol cocido.

Como muestra la Figura 2, los resultados demostraron que la acidez aumentó de manera progresiva. Este incremento refleja la tendencia esperada de deterioro del producto. No obstante, al comparar los tratamientos, la prueba post-hoc de Tukey indicó que el tratamiento T3 mostró una reducción significativa de la acidez en contraste con el tratamiento testigo (T0), lo que sugiere que la combinación específica de ozono y aceite esencial de orégano optimiza la conservación del producto al mantener un control sobre la acidez durante los 21 días.

El pH es un parámetro clave en la estabilidad nutricional y microbiológica de productos cocidos como el fréjol.

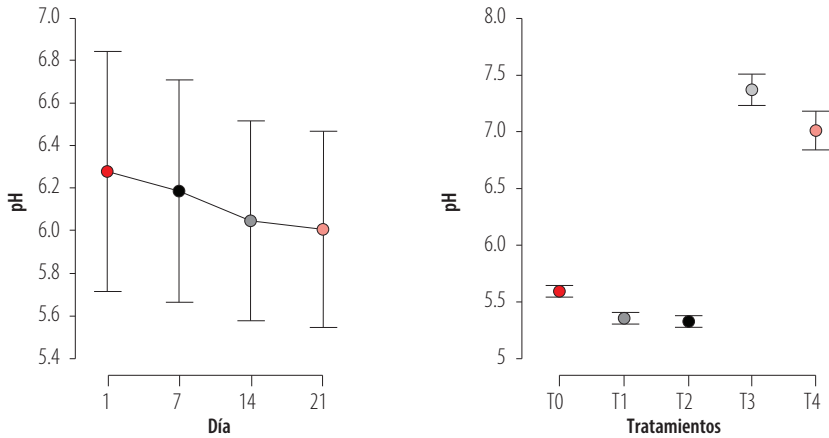


FIGURA 3. pH del fréjol cocido durante el almacenamiento: (a) pH medio por día; (b) pH medio por tratamiento.

De acuerdo a la Figura 3, los valores de pH registrados en los diferentes tratamientos y días de almacenamiento mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$), según el análisis de varianza (ANOVA), destacándose tanto el efecto del tratamiento ($F = 32.41$), como el del tiempo de almacenamiento ($F = 1548.16$), así como su interacción ($F = 5.49$), evidenciando la influencia de los factores sobre la variable pH. La Figura 3 muestra a T2, y la disminución significativa del pH entre el día 0 (5.49 ± 0.07) y el día 21 (5.25 ± 0.01), reforzando la actividad conservante. Este comportamiento fue similar en T1, aunque con variaciones menos marcadas. Por su parte, T0 (testigo) mostró un pH relativamente constante durante los 21 días, con valores ligeramente superiores entre 5.51 ± 0.02 y 5.57 ± 0.03 , sin variaciones estadísticamente significativas entre días, lo cual es consistente con el comportamiento natural del producto sin aditivos.

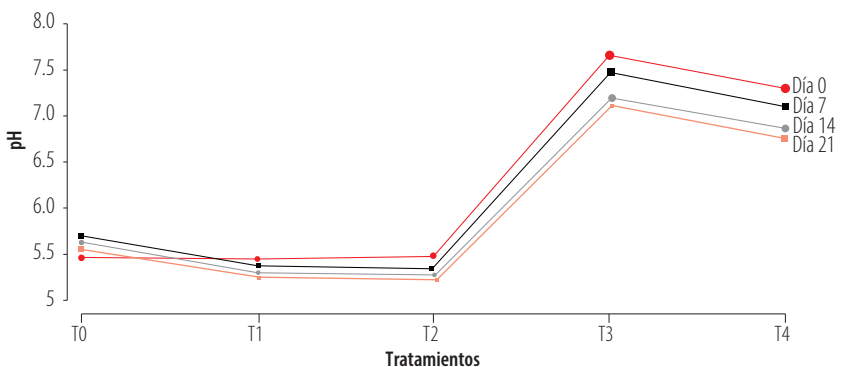


FIGURA 4. Variación del pH por tratamiento a lo largo del almacenamiento (días 0, 7, 14 y 21).

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas ($p < 0.001$). El tratamiento T2 (0.50 ppm de ozono + 0.30 % de aceite esencial de orégano), mantuvo los valores de pH más estables y ligeramente ácidos, fluctuando entre 5.49 ± 0.07 (día 0) y $5.25 \pm$



0.01 (día 21), diferencia significativa ($p < 0.001$), según la prueba de Tukey. En la Figura 4, se observa que, T1 (0.25 ppm de ozono + 0.30 % de orégano), mostró estabilidad, con valores entre 5.57 ± 0.01 y 5.29 ± 0.02 . Los tratamientos T3 y T4, con 0.50 % de aceite esencial de orégano, registraron un incremento abrupto del pH al inicio del almacenamiento, alcanzando valores alcalinos de hasta 7.63 ± 0.01 en T3 (día 0) y 7.37 ± 0.03 en T4 (día 0), con una disminución paulatina hasta 7.01 ± 0.03 (T3, día 21) y 6.85 ± 0.02 (T4, día 21).

El recuento de aerobios mesófilos en el fréjol cocido mostró diferencias estadísticamente significativas tanto entre los tratamientos ($p < 0.001$), como a lo largo del tiempo de almacenamiento ($p < 0.001$), y la interacción significativa tratamiento \times día ($p = 0.047$), según el análisis de varianza (ANOVA). Según la prueba de Fisher LSD al 95 % de confianza, los tratamientos con aceite esencial de orégano y ozono (T1, T2, T3 y T4) presentaron reducciones significativas en comparación con el control (T0). Estos resultados evidencian la reducción de la carga microbiológica a lo largo de los 21 días de evaluación.

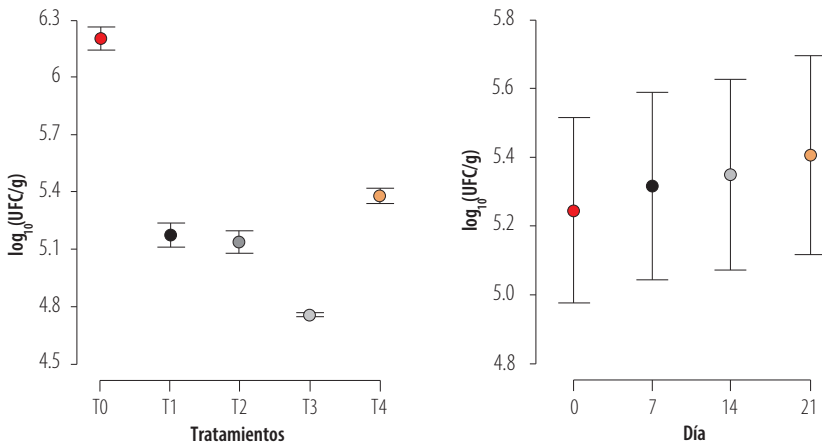


FIGURA 5. Recuento de aerobios mesófilos (\log_{10} UFC/g) del fréjol cocido: (a) por tratamiento; (b) por tiempo de almacenamiento.

La carga microbiológica reportada fue de entre 5.2 y 5.3 \log_{10} UFC/g con una ascendencia que indica que las diferencias entre días, aunque estadísticamente significativas ($p < 0.001$), no fueron marcadas ampliamente. Se observó en la Figura 5, que todos los tratamientos lograron reducir significativamente la carga microbiana en comparación con el tratamiento control (T0), 6.10 \log_{10} UFC/g. T1 (0.25 ppm ozono + 0.30 % AEO): 5.07 \log_{10} UFC/g, reducción de 1.03 unidades log. T2 (0.50 ppm ozono + 0.30 % AEO): 4.99 \log_{10} UFC/g, reducción de 1.11 unidades log. T3 (0.25 ppm ozono + 0.50 % AEO): 4.73 \log_{10} UFC/g, reducción de 1.37 unidades logarítmicas. T4 (0.50 ppm ozono + 0.50 % AEO): 5.31 \log_{10} UFC/g, reducción de 0.79 unidades log.

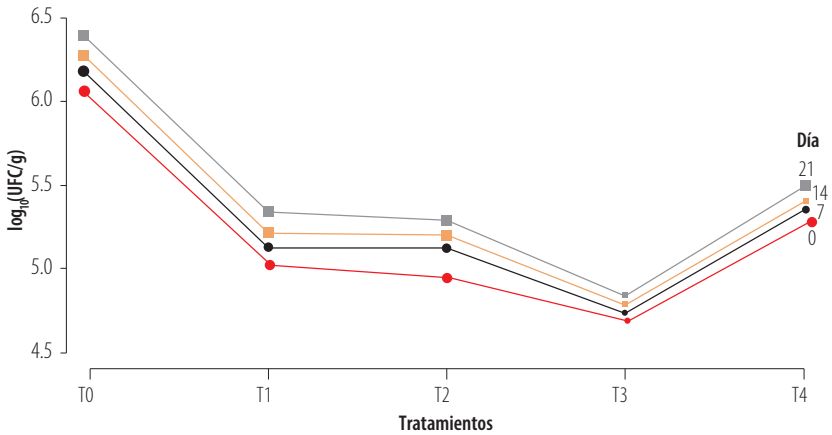


FIGURA 6. Recuento de aerobios mesófilos (\log_{10} UFC/g) por tratamiento a lo largo del almacenamiento (días 0/1, 7, 14 y 21)

La carga microbiológica (aerobios), como se observa en la Figura 6, el fréjol cocido mostró una reducción consistente en todos los tratamientos experimentales (T1–T4), en comparación con el control (T0). Este hallazgo valida la eficacia antimicrobiana de la combinación del ozono y el aceite esencial de orégano. Específicamente, el tratamiento T3 se destacó por presentar la mayor reducción inicial en el recuento de aerobios mesófilos y también demostró una estabilidad microbiológica a lo largo de los 21 días de almacenamiento. La combinación de factores en el T3 optimizó el efecto de conservación del producto de forma prolongada.

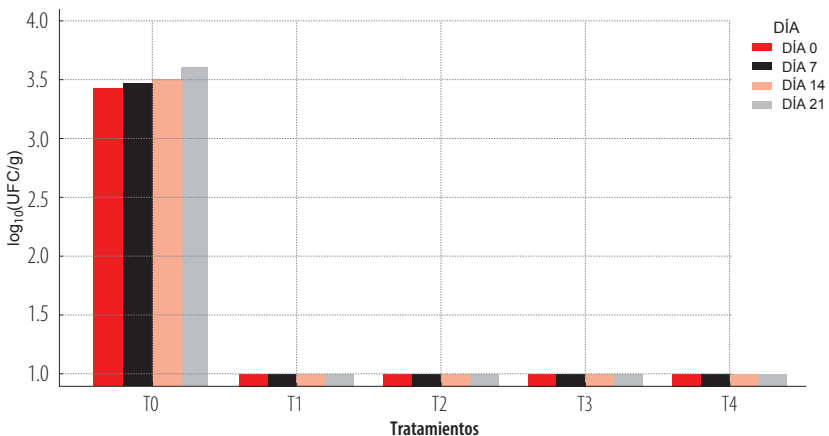


FIGURA 7. Coliformes totales (\log_{10} UFC/g) por tratamiento durante el almacenamiento (días 0/1, 7, 14 y 21)

La Figura 7 muestra que el tratamiento control (T0) presentó una carga microbiana inicial de 3.5 \log_{10} UFC/g en coliformes totales. Tras la aplicación de ozono y aceite esencial de orégano, los tratamientos experimentales (T1 a T4) registraron una reducción de hasta



2.60 log₁₀ UFC/g en coliformes totales, evidenciando diferencias altamente significativas ($p < 0.001$), respecto al tratamiento control. Esto demuestra que incluso la dosis más baja evaluada (T1: 0.25 ppm de ozono +0.30% de AEO), fue suficiente para la reducción de coliformes totales, lo que confirma la efectividad de los tratamientos aplicados (ozono y aceite esencial de orégano) contra la población de coliformes totales en el fréjol cocido.

Los resultados del análisis microbiológico para *Escherichia coli* en fréjol cocido tratado con ozono y aceite esencial de orégano mostraron una respuesta consistente a través de los diferentes tratamientos y períodos de evaluación. Los tratamientos, incluyendo el control (T0), mantuvieron niveles de *Escherichia coli* por debajo del límite de detección (<3 UFC), comportamiento que se mantuvo constante durante los diferentes períodos de evaluación (días 1, 7, 14 y 21), manteniendo niveles microbiológicamente aceptables durante el período de almacenamiento estudiado.

Los resultados obtenidos para *Staphylococcus aureus* fueron favorables, ya que se reportó (<10 UFC/g). Este hallazgo indica que la combinación del proceso de cocción del fréjol con los tratamientos aplicados (ozono y aceite esencial de orégano) fue eficaz.

La ausencia de *Salmonella spp.* en todas las muestras evaluadas es atribuible a las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) practicadas en el campo, el almacenamiento de materia prima y el procesamiento asociado a Buenas Prácticas de Manufactura (BPM). Tanto BPA como BPM contribuyeron significativamente a minimizar la contaminación cruzada, reduciendo así el riesgo de presencia de este patógeno.

Al inicio del almacenamiento (día 0), todos los tratamientos mostraron puntuaciones elevadas de aceptabilidad (4.6 ± 0.3), las cuales se mantuvieron relativamente constantes hasta el día 7 (4.4 ± 0.4). En el día 14 se observó una ligera disminución en las puntuaciones (3.8 ± 0.5), tendencia que continuó hasta el día 21 (3.5 ± 0.6). Sin embargo, estas variaciones no fueron estadísticamente significativas entre los tratamientos. Los análisis post hoc mediante la prueba de Tukey confirmaron la ausencia de diferencias significativas entre pares de tratamientos ($p > 0.05$), aunque se observó una tendencia favorable en la preservación de atributos sensoriales en los tratamientos con aceite esencial y ozono (T3 y T4) hacia el final del período de almacenamiento, manteniendo puntuaciones de aceptabilidad ligeramente superiores (3.7 ± 0.4) en comparación con el control (3.3 ± 0.5). El coeficiente de variación (CV) se mantuvo por debajo del 15 % en todas las evaluaciones, lo que indica una buena consistencia en las valoraciones del panel sensorial.

DISCUSIÓN

La acidez debe controlarse en alimentos cocidos, ya que los microorganismos generan ácidos orgánicos alterando la acidez de la matriz alimentaria. Los niveles superiores a 0.5 % son desfavorables para bacterias patógenas [29], por lo que la acidez es un factor clave para evaluar la calidad y la estabilidad de los productos alimenticios.

El aceite esencial de orégano es un agente antimicrobiano eficaz debido a la alta concentración de carvacrol y timol. Estos fenoles incrementan la permeabilidad de la membrana celular, y este mecanismo de acción resulta en la inhibición del desarrollo y en la



reducción de la viabilidad bacteriana, previendo la acidificación del medio [30]. Lo anterior coincide con los niveles de acidez reportados, lo que demuestra la eficacia del control de la acidez en fréjol cocido al aplicar los tratamientos, particularmente durante los primeros siete días de almacenamiento, a causa de la aplicación de ozono, que posee un efecto oxidante sobre los microorganismos y es efectivo para reducir la carga microbiológica inicial.

El ozono ha sido reconocido por su capacidad para modular el pH [20]. Posee un efecto oxidante sobre los microorganismos y es efectivo para reducir la carga microbiológica inicial [31]. Los tratamientos aplicados mantuvieron el pH del fréjol cocido en un rango de 5.5-6.5, lo que contribuye para la fermentación de oligosacáridos, favorece la digestibilidad y reduce la producción de gases y la acidez estomacal, aunque su impacto requiere mayor investigación [32]. Además, actúa como agente multifuncional, facilitando la eliminación de contaminantes químicos y mejorando las propiedades nutricionales, organolépticas y funcionales de los alimentos [33].

Para mantener el valor nutricional y la calidad microbiológica del fréjol cocido, es esencial controlar el pH, pues este interactúa con sus componentes estructurales principales: lípidos, proteínas y carbohidratos [34]. Los tratamientos T1 y T2, que mantuvieron un pH \approx 5.3-5.4, ligeramente ácido, inhibieron el crecimiento microbiano y mejoraron la estabilidad del producto [35]. En medios ácidos, la hidrofobicidad del aceite esencial de orégano aumenta, lo cual permite potenciar su actividad antimicrobiana [36]. El aceite esencial de orégano ejerce su acción antimicrobiana al alterar la permeabilidad de la membrana celular [37], provocando la pérdida de metabolitos intracelulares y, en consecuencia, la muerte celular [38]. En estudios de recubrimiento de fréjol precocido [39], se observaron rangos de pH de 6.8 a 7.2. De igual manera, en sopas instantáneas de fréjol [40], se reportaron valores de pH 6.42.

El ozono elimina de forma efectiva bacterias grampositivas y gramnegativas dañando sus ácidos nucleicos [41]. En este estudio, la aplicación de aceite esencial de orégano al 0.50 %, y ozono a 0.25 ppm fue la combinación más efectiva en la inhibición del crecimiento microbiano. Estos resultados sugieren que, a mayor concentración de aceite esencial, el entorno se alcaliniza neutralizando los ácidos orgánicos presentes. El tratamiento T3 reportó una carga final de 4.76 log UFC/g, reporte que fue ratificado en estudios de aceite esencial de orégano en tilapias donde se consiguió una concentración final de 5.30 log UFC/g con la aplicación del bioactivo [42]. De igual manera, en la conservación de chorizo mexicano se reportó un desarrollo más controlado de aerobios con un promedio de 6 log UFC/g, entre los días 1 y 14 [43].

En la conservación de hamburguesas de res se reportaron valores estables hasta el quinto día, de $2,8 \times 10^5$ UFC/g con 0,4 % de aceite esencial. Este tratamiento fue el único en prolongar esta constancia hasta el día 15 [44]. Al aplicar el aceite esencial de orégano en filetes de tilapia, se observó una disminución de 1 unidad logarítmica en el recuento microbiano [45]. La aplicación de ozono en leche cruda permitió una reducción de entre 0.7 y 2.5 unidades logarítmicas en aerobios [46]. Finalmente, la aplicación de ozono a 0.024 g/L sobre jitomate permitió eliminar el 99.5 % de bacterias mesofílicas aerobias [47].

La aplicación conjunta de aceite esencial de orégano y ozono en fréjol cocido mostró una respuesta consistente a través de los diferentes tratamientos y períodos de



evaluación. La mayoría de las muestras, incluyendo el control (T0), y los tratamientos (T1-T4), mantuvieron niveles de *Escherichia coli* por debajo del límite de detección (<3 UFC).

La dosis más baja (T1: 0.25 ppm ozono + 0.30 % AEO) fue suficiente para lograr un control completo de coliformes totales, en contraste con estudios de aplicación de ozono en leche cruda [46], donde se reportó la reducción de coliformes totales entre 0.63 y 3.70 unidades logarítmicas. Estos resultados concuerdan con la reducción de 2.60 log₁₀ UFC/g obtenida en el presente estudio. De manera similar, la aplicación de ozono en granos de quinua [48] permitió disminuir los niveles de coliformes totales en un rango de 0.38 a 1.14 log₁₀ UFC/g, reafirmando el potencial del ozono como agente antimicrobiano en matrices vegetales.

En cuanto a *Staphylococcus aureus*, los tratamientos presentaron valores <10 UFC, lo que indica que todos los tratamientos, junto con el proceso de cocción fueron eficaces para reducir la carga microbiana. En estudios realizados en albóndigas de res [49], se obtuvieron reducciones <2 Log UFC/g de *Staphylococcus aureus* con concentraciones de 0.5-2 % de AEO. Asimismo, al aplicar AEO en concentraciones de 0.25 y 0.125 % sobre superficies de acero inoxidable, se lograron reducciones de 1-2 log UFC en *Staphylococcus aureus* [50].

Estudios *in vitro* han confirmado la capacidad del aceite esencial de orégano para inhibir el desarrollo de *Salmonella spp.* en productos agrícolas. [51] El ozono es un método seguro y eficaz para la desinfección de alimentos, ya que elimina patógenos sin dejar residuos y, garantiza la inocuidad del producto [52].

Análisis sensorial del fréjol cocido

Los tratamientos aplicados no generaron cambios sensoriales negativos en el fréjol cocido. Investigaciones centradas en el uso de ozono demuestran que existe un equilibrio entre la acidez y el sabor, lo cual es crucial para la aceptación del consumidor. La exposición al ozono reduce la actividad de las enzimas catalasa y peroxidasa, responsables de la oxidación de fenoles que generan colores pardos u oscurecimiento en vegetales [19].

La concentración de los compuestos activos influye directamente en la aceptabilidad sensorial de los alimentos. El uso de coberturas o películas protectoras contribuye a disminuir el impacto sensorial directo en el alimento [53]. El uso de AEO en niveles bajos, como el 0.3 % evaluado en matrices vegetales, es clave para optimizar la preferencia del consumidor. Por el contrario, concentraciones elevadas de estos agentes se asocian con la aparición de sabores o aromas intensos, lo que impacta negativamente la calidad percibida y reduce la intención de consumo [54].

Vegetales, frutas, hortalizas y legumbres frescas tratadas con ozono han mostrado efectos positivos en la textura, firmeza, color y apariencia [55]. La aceptabilidad sensorial del fréjol cocido con los tratamientos es comparable a la del control (T0). Esta equivalencia confirma la viabilidad de implementar esta estrategia de conservación, dado que el producto final mantiene las cualidades organolépticas necesarias para ser aceptado por el consumidor.



CONCLUSIONES

La aplicación combinada de aceite esencial de orégano y ozono en fréjol cocido demostró un impacto significativo en el control de la acidez y la reducción de la carga microbiana. El ozono, como agente oxidante, mostró una capacidad notable para inactivar microorganismos y degradar enzimas responsables del deterioro, mientras que el aceite de orégano, rico en compuestos fenólicos como el timol y el carvacrol, aportó propiedades antimicrobianas y antioxidantes que complementaron y potenciaron el efecto conservante.

Los tratamientos que mantuvieron un pH ligeramente ácido (entre 5.3 y 5.4), inhibieron el crecimiento microbiano. Esta intervención no térmica se presenta como una alternativa viable para extender la vida útil de productos vegetales cocidos, sin comprometer los atributos sensoriales ni la integridad nutricional.

Se determinó que todos los tratamientos activos (T1 a T4) lograron una reducción significativa de la carga microbiana tanto en aerobios mesófilos como en coliformes totales. El tratamiento T3 (0.25 ppm ozono +0.50 % AEO) demostró ser el más eficaz al conseguir la mayor reducción en aerobios mesófilos ($1.37 \log_{10}$ UFC/g), y una importante disminución de coliformes totales ($2.60 \log_{10}$ UFC/g). Estos resultados evidencian una alta eficacia antimicrobiana y un efecto sinérgico de la combinación de ozono y aceite esencial de orégano, lo que garantiza el control microbiano en el producto durante 21 días de almacenamiento.

Durante el período de almacenamiento (21 días), la evaluación sensorial confirmó que los tratamientos aplicados conservaron la apariencia, el color, el olor, la textura y el sabor, lo cual es deseable en estrategias de conservación que buscan mantener la calidad sensorial original del alimento. La combinación de ozono y aceite esencial de orégano no solo garantiza la seguridad microbiológica y la estabilidad del producto, sino que también preserva sus propiedades organolépticas. Esto sugiere que la combinación de aceite esencial de orégano y ozono constituye una alternativa eficaz para prolongar la vida útil del producto, sin afectar su aceptabilidad.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los autores contribuyeron en todas las etapas de elaboración del presente artículo.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron herramientas de asistencia de lenguaje natural (Large Language Models, LLMs), con el propósito de optimizar la redacción y formato de los metadatos de la publicación del conjunto de datos en el repositorio de acceso abierto. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.



DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos que respaldan las conclusiones de este estudio están disponibles en el repositorio de acceso abierto Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17694308>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con los contenidos de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Lohita, B., & Srijaya, M. (2024). Novel technologies for shelf-life extension of food products as a competitive advantage: A review. En *Advances in Science, Technology & Innovation Food Production, Diversity, and Safety Under Climate Change* (pp. 285–306). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51647-4_24
- [2] Haouet, M. N., Tommasino, M., Mercuri, M. L., Benedetti, F., Di Bella, S., Framboas, M., Pelli, S. & Altissimi, M. S. (2019). Experimental accelerated shelf life determination of a ready-to-eat processed food. *Italian Journal of Food Safety*, 7(4). <https://doi.org/10.4081/ijfs.2018.6919>
- [3] Begum, A., Rizwana, S., & Makroo, H. A. (2022). Modeling of the Shelf Life of Foods. En *Shelf Life and Food Safety* (pp. 61-76). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003091677-4>
- [4] Bai, Q., Li, M., Zhou, J., Imran, A., de Souza, T. S. P., Barrow, C., Dunshea, F., & Suleria, H. A. R. (2024). Influence of processing methods on phytochemical composition of different varieties of beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food Reviews International*, 40(7). <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2245026>
- [5] Bernardi, C., Macri, G., Biagi, M., Miraldi, E., Finetti, F., & Trabalzini, L. (2023). *In vitro* digestion of *Phaseolus vulgaris* L. cooked beans induces autophagy in colon cancer cells. *Foods*, 12(4), 839. <https://doi.org/10.3390/foods12040839>
- [6] Wahome, S. W., Githiri, M. S., Kinyanjui, P. K., Toili, M. E. M., & Angenon, G. (2023). Genome-wide association study of variation in cooking time among common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), accessions using Diversity Arrays Technology markers. *Legume Science*, 5(4), e184. <https://doi.org/10.1002/leg3.184>
- [7] Jan, S., Rashid, M., Abd_Allah, E. F., & Ahmad, P. (2020). Biological efficacy of essential oils and plant extracts of cultivated and wild ecotypes of *Origanum vulgare* L. *BioMed Research International*, 2020(1). <https://doi.org/10.1155/2020/8751718>
- [8] Shanaida, M., & Golembiowska, O. (2018). Identification and component analysis of triterpenoids in *Monarda fistulosa* L. and *Ocimum americanum* L. (Lamiaceae), aerial parts. *ScienceRise: Pharmaceutical Science*, 3(13), 26–31. <https://doi.org/10.15587/2519-4852.2018.135767>
- [9] Castilho, P. C., Savluchinske-Feio, S., Weinhold, T. S., & Gouveia, S. C. (2012). Evaluation of the antimicrobial and antioxidant activities of essential oils, extracts and their main components from oregano from Madeira Island, Portugal. *Food Control*, 23(2), 552–558. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.031>
- [10] Ventura, S. P. M., E Silva, F. A., Qumental, M. V., Mondal, D., Freire, M. G., & Coutinho, J. A. P. (2017). Ionic-liquid-mediated extraction and separation processes for bioactive compounds: past, present, and future trends. *Chemical Reviews*, 117(10), 6984–7052. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00550>
- [11] Granata, G., Stracquandano, S., Leonardi, M., Napoli, E., Malandrino, G., Cafiso, V., Stefani, S., & Geraci, C. (2021). Oregano and thyme essential oils encapsulated in chitosan nanoparticles as effective antimicrobial agents against foodborne pathogens. *Molecules*, 26(13). <https://doi.org/10.3390/molecules26134055>
- [12] Baycheva, S. K., & Dobrova, K. Z. (2021). Chemical composition of Bulgarian white oregano (*Origanum heracleoticum* L.), essential oils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1031(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1031/1/012107>
- [13] Leyva-López, N., Gutiérrez-Grijalva, E., Vázquez-Olivo, G., & Heredia, J. (2017). Essential oils of oregano: Biological activity beyond their antimicrobial properties. *Molecules*, 22(6), 989. <https://doi.org/10.3390/molecules22060989>
- [14] Bautista-Hernández, I., Aguilar, C. N., Martínez-Ávila, G. C. G., Torres-León, C., Ilna, A., Flores-Gallegos, A. C., Kumar Verma, D., & Chávez-González, M. L. (2021). Mexican oregano (*Lippia graveolens* Kunth), as source of bioactive compounds: A review. *Molecules*, 26(17), 5156. <https://doi.org/10.3390/molecules26175156>
- [15] Muriel-Galet, V., Cran, M. J., Bigger, S. W., Hernández-Muñoz, P., & Gavara, R. (2015). Antioxidant and antimicrobial properties of ethylene vinyl alcohol copolymer films based on the release of oregano essential oil and green tea extract components. *Journal of Food Engineering*, 149, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.007>
- [16] Elshafie, H., Armentano, M., Carmosino, M., Bufo, S., De Feo, V., & Camele, I. (2017). Cytotoxic activity of *Origanum vulgare* L. on hepatocellular carcinoma cell line HepG2 and evaluation of its biological activity. *Molecules*, 22(9), 1435. <https://doi.org/10.3390/molecules22091435>

- [17] Manso, S., Becerril, R., Nerin, C., & Gómez-Lus, R. (2015). Influence of pH and temperature variations on vapor phase action of an antifungal food packaging against five mold strains. *Food Control*, 47, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.06.014>
- [18] Efrati, R., Natan, M., Pelah, A., Haberer, A., Banin, E., Dotan, A., & Ophir, A. (2014). The combined effect of additives and processing on the thermal stability and controlled release of essential oils in antimicrobial films. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(15). <https://doi.org/10.1002/app.40564>
- [19] Sarron, E., Gadonna-Widehem, P., & Aussenac, T. (2021). Ozone treatments for preserving fresh vegetables quality: A critical review. *Foods*, 10(3), 605. <https://doi.org/10.3390/foods10030605>
- [20] Pandiselvam, R., Subhashini, S., Banuu Priya, E. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., & Shahir, S. (2019b). Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety. *Ozone: Science & Engineering*, 41(1), 17–34. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1490636>
- [21] Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K., & Seydim, A. C. (2004). Use of ozone in the food industry. *LWT – Food Science and Technology*, 37(4), 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.014>
- [22] Cosemar Ozono. (2024). *El uso del ozono en la conservación de frutas y hortalizas: Propiedades y beneficios*. Poscosecha. <https://www.poscosecha.com/cosemar-ozono/el-uso-del-ozono-en-la-conservacion-de-frutas-y-hortalizas-propiedades-y-beneficios>
- [23] Miller, F. A., Silva, C. L. M., & Brandão, T. R. S. (2013). A review on ozone-based treatments for fruit and vegetables preservation. *Food Engineering Reviews*, 5(2), 77–106. <https://doi.org/10.1007/s12393-013-9064-5>
- [24] Cullen, P. J., Valdramidis, V. P., Tiwari, B. K., Patil, S., Bourke, P., & O'Donnell, C. P. (2010). Ozone processing for food preservation: An overview on fruit juice treatments. *Ozone: Science & Engineering*, 32(3), 166–179. <https://doi.org/10.1080/01919511003785361>
- [25] Pontigo, A., Trejo, M., & Lira, A. (2015). Desarrollo de un recubrimiento con efecto antifúngico y antibacterial a base de aceite esencial de orégano para conservación de papaya maradol. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(1), 58–63. <https://www.redalyc.org/pdf/813/81339864008.pdf>
- [26] Grande V., L., González V., R., Lucas L., J., Carhuallanqui P., A., Guevara F., J., & Ramos D., D. (2023). Efecto antimicrobiano del aceite esencial de orégano (*Origanum vulgare*), frente a *Staphylococcus aureus* en carne de pollo. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(1). <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i1.24598>
- [27] Medrano Sucari, E. J., & Medrano Sucari, D. J. (2021). *Actividad antimicrobiana y efecto desinfectante del aceite esencial de Origanum vulgare frente a Staphylococcus aureus y Escherichia coli* [Tesis de licenciatura, Universidad María Auxiliadora]. Repositorio UMA. <https://repositorio.uma.edu.pe/handle/20.500.12970/375>
- [28] Vásquez Valles, M., Alvarado Salinas, P., Rodríguez Haro, I., Saldaña Sevilla, W., Reyes Lázaro, W., & Vargas Huamán, A. (2015). Efecto del aceite esencial de *Origanum vulgare* sobre la supervivencia de *Staphylococcus aureus* y especies de *Salmonella* spp. en carne de cerdo. *Revista de investigación científica (REBIOL)*, 34(1), 65–72. <https://revistas.unitr.edu.pe/index.php/faccbiol/article/view/589>
- [29] Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). Food protection with chemicals, and by biocontrol. En *Modern food microbiology* (7th ed., pp. 301–350). Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-23413-6_13
- [30] Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods, a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>
- [31] Seminario, L., Acuña, J., & Williams, S. (2010). *El ozono y su aplicación en la conservación de alimentos*. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad de Concepción. Concepción, Chile, 1-7. https://www.researchgate.net/publication/228391008_El_Ozono_y_su_Aplicacion_en_la_Conservacion_de_Alimentos
- [32] Temizkan, I., Kamalak, A., & Canbolat, O. (2011). Effect of oregano oil on in vitro gas production, digestibility and metabolizable energy of some feedstuffs. *Journal of Applied Animal Research*, 39(2), 132–135. <https://doi.org/10.1080/09712119.2011.565550>
- [33] Siteo, E. D. P. E., De Alencar, E. R., Faroni, L. R. D., Fontes, E. A. F., Silva, M. V. D. A., Machado, F. J., Pandiselvam, R., & Magalhães, C. G. (2024). Application of ozone at low-pressure: Control of egg and larval phases of *Zabrotes subfasciatus*, inactivation of *Aspergillus flavus* and qualitative changes in bean grains. *Food Control*, 158, 110238. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110238>



- [34] Zhao, S., Li, Y., Liu, Q., Xia, X., Chen, Q., Liu, H., & Kong, B. (2024). Characterization, release profile, and antibacterial properties of oregano essential oil nanoemulsions stabilized by soy protein isolate/tea saponin nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 151, 109856. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109856>
- [35] Galdeano, M. C., Wilhelm, A. E., Goulart, I. B., Tonon, R. V., Freitas-Silva, O., Germani, R., & Chávez, D. W. H. (2018). Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.15617>
- [36] Navarro-Cruz, A. R., Ochoa-Velasco, C. E., Caballero-Alvarez, F. J., Lazzcano-Hernández, M. A., Vera-López, O., López-Malo, A., & Avila-Sosa, R. (2018). Effect of pH and Mexican oregano (*Lippia berlandieri* Schauer), essential oil added to carboxymethyl cellulose and starch edible films on *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Food Quality*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/1659394>
- [37] Albado Plaus, E., Sáez Flores, G., & Grabiél Ataucursi, S. (2001). Composición química y actividad antibacteriana del aceite esencial del *Origanum vulgare* (orégano). *Revista Médica Herediana*, 12(1), 16–19. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1018-130X2001000100004&script=sci_arttext&tlng=en
- [38] Rodríguez-García, I., Silva-Espinoza, B., Ortega-Ramírez, L., Leyva, J., Siddiqui, M., Cruz-Valenzuela, González-Aguilar, G., & Ayala-Zavala, J. F. (2015). Oregano Essential Oil as an Antimicrobial and Antioxidant Additive in Food Products. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 56(10), 1717–1727. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.800832>
- [39] Cristóbal de la Cruz, E. P. (2022). *Obtención de frijol (Phaseolus vulgaris L.) precocido y preservado con recubrimiento de aceite esencial de orégano (Origanum vulgare)* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/685281e2-cc68-4d6a-a1ae-f2d9a32fa0bf>
- [40] López Echeverría, M. Á., & Sánchez Silva, H. E. (2011). *Elaboración de sopa instantánea a partir de harina de fréjol* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Institucional ESPOL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/20012>
- [41] Pandiselvam, R., Singh, A., Agriopoulou, S., Sachadyn-Król, M., Aslam, R., Gonçalves Lima, C. M., Khanashyam, A. C., Kothakota, A., Atakan, O., Kumar, M., Mathanghi, S. K., & Mousavi Khaenegah, A. (2022). A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.008>
- [42] Aguilar Paquirachín, E., Guamuro Fonseca, A. M., Minchán-Velayarce, H. H., Pasapera-Campos, S. E., & Ticona Yujra, J. A. (2024). Análisis microbiológico y sensorial de filetes de tilapia (*Oreochromis niloticus*) con recubrimiento bioactivo incorporando aceite esencial de orégano (*Origanum vulgare*). *Revista Científica Pakamuros*, 12(1), 27–38. <https://doi.org/10.37787/tteydv76>
- [43] Castellanos-Santos, O. R., Méndez-Zamora, G., Rivera De Alba, J. A., & Flores Girón, E. (2025). Aplicación de aceite esencial de orégano (*Lippia berlandieri* Schauer) en la conservación de chorizo mexicano. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 19. <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1859>
- [44] Tapia Barrios, J. A., & Quintana Pintado, K. M. (2022). *Conservación de hamburguesa de res con aceite esencial de orégano (Origanum vulgare)* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/434>
- [45] Mera Mendoza, C. R. (2015). *Efecto del aceite esencial de orégano (Origanum vulgare L.), como agente antimicrobiano en la conservación de la carne de dos especies de tilapia: negra (Oreochromis mossambicus), y roja (Oreochromis niloticus)*, [Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio institucional UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/f3fafaeb-c3b6-429d-b99f-7d75eb168ebe>
- [46] Soque Díaz, A. (2019). *Evaluación bacteriológica de leche cruda, sometida a tres concentraciones de ozono, mediante su comprobación microbiológica en placas petrifilm* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18587>
- [47] Rodríguez Barboza, K. G., Abraham Juárez, M. D. R., & Rivera Caballero, D. (2016). Eliminación de microorganismos mediante la aplicación de ozono. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1932–1935. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1325>



- [48] Baygorrea Perez, S. (2019). *Evaluación del proceso de ozonificación para la reducción de los microorganismos indicadores de inocuidad en quinoa Chenopodium quinoa Willd. para exportación* [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/a39fb65d-7e8f-4da9-ade7-03872f572e8c>
- [49] Pesavento, G., Calónico, C., Bilia, A., Barnabei, M., Calesini, F., Addona, R., Mencarelli, L., Carmagnini, L., Di Martino, M., & Lo Nostro, A. (2015). Antibacterial activity of Oregano, Rosmarinus and Thymus essential oils against *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes* in beef meatballs. *Food Control*, 54, 188-199. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.01.045>
- [50] Dos Santos Rodrigues, J. B., de Carvalho, R. J., de Souza, N. T., de Sousa Oliveira, K., Franco, O. L., Schaffner, D., de Souza, E. L., & Magnani, M. (2017). Effects of oregano essential oil and carvacrol on biofilms of *Staphylococcus aureus* from food-contact surfaces. *Food Control*, 73, 1237–1246. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.10.043>
- [51] Hulánková, R., & Bořilová, G. (2012). In vitro combined effect of oregano essential oil and caprylic acid against *Salmonella* serovars, *Escherichia coli* O157: H7, *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes*. *Acta Veterinaria Brno*, 80(4), 343-348. <https://doi.org/10.2754/avb201180040343>
- [52] Hassenberg, K., Idler, C., Molloy, E., Geyer, M., Plöchl, M., & Barnes, J. (2007). Use of ozone in a lettuce-washing process: an industrial trial. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(5), 914–919. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2815>
- [53] Costa, A. G., & Ferreira, L. C. (2021). *Potencial antimicrobiano do óleo essencial de orégano (Origanum vulgare L.) e sua aplicação em alimentos* [Trabalho de conclusão de curso, Fatec Estudante Rafael Almeida Camarinha]. <https://doi.org/10.53934/9786585062039-18>
- [54] Cattelan, M. G., Castilhos, M. B. M. D., Niz da Silva, D. C. M., Conti-Silva, A. C., & Hoffmann, F. L. (2015). Oregano essential oil: Effect on sensory acceptability. *Nutrition & Food Science*, 45(4), 574-582. <https://doi.org/10.1108/NFS-02-2015-0014>
- [55] García-Bañuelos, M. L., Gardea-Béjar, A. A., Vázquez-Moreno, L., García Hernández, J., Ávila-Quezada, G., Pérez-Tello, M. G., & Guzmán-Partid, A. M. (2023). El papel del ozono en la calidad e inocuidad alimentaria. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 46(3). <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.3.309>

Diseño y evaluación de un sistema basado en Antenas log-periódicas para la detección de la componente electromagnética de rayos cósmicos

Henry Sebastián Mayorga Pérez^{1*}, Alejandro David Amagua Romero¹, Hugo Oswaldo Moreno Avilés¹

¹Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, Riobamba-Ecuador.

*Autor de correspondencia/ corresponding author: henry.mayorga@epoch.edu.ec

Design and evaluation of a detection system for the electromagnetic component of cosmic rays using log-periodic antennas

Resumen

Este estudio presenta el diseño y la evaluación de un sistema para la detección de la componente electromagnética de las lluvias cósmicas extensas (EAS por sus siglas en inglés) generadas por rayos cósmicos ultraenergéticos. Se propone el uso de antenas log-periódicas y un sistema de radio definida por software (SDR por sus siglas en inglés) para la adquisición y análisis de señales en el rango de 20-80 MHz. Se realizaron simulaciones utilizando ANSYS y pruebas experimentales con un analizador de redes vectoriales, obteniendo coeficientes de reflexión menores a -10 dB. La adquisición de datos se llevó a cabo mediante SDR, con un sistema de disparo automático y filtrado digital. Se recolectaron datos durante 47 días con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Los resultados mostraron la detección de señales en el rango de 40-60 MHz, con variabilidad horaria y patrones que sugieren la presencia de eventos asociados a rayos cósmicos. Sin embargo, la validación cruzada con detectores de partículas es necesaria para confirmar estos hallazgos. Este trabajo demuestra la viabilidad de la detección por radio de lluvias cósmicas y plantea la necesidad de integrar estos sistemas con arreglos de detectores de partículas para mejorar la discriminación de eventos.

Palabras clave: rayos cósmicos ultra energéticos (UHECRs), lluvias cósmicas extensas (EAS), radio definida por software, detección de rayos cósmicos, antena log-periódica de dipolos, sistema de disparo automático, detección por radio de rayos cósmicos.

Abstract

This study presents the design and evaluation of a detection system for the electromagnetic component of Extensive Air Showers (EAS) generated by ultra-high energy cosmic rays (UHECRs). The proposed approach employs log-periodic antennas and a software-defined radio (SDR) system for signal acquisition and analysis in the 20-80 MHz frequency range. Simulations were performed using ANSYS, and experimental tests with a vector network analyzer, yielding reflection coefficients below -10 dB. Data acquisition was performed via an SDR-based system, incorporating an automatic triggering mechanism and digital filtering. Data were collected over 47 days with a sampling frequency of 1 Hz. The results indicate the detection of signals in the 40-60 MHz range, showing temporal variability and patterns that suggest the presence of



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Dennis Cazar

Recibido /
Received:
24/04/2025

Aceptado /
Accepted:
14/08/2025

Publicado en línea /
Published online:
15/05/2026



cosmic-ray-induced events. However, cross-validation with particle detectors is required to confirm these findings. This work demonstrates the feasibility of radio-based cosmic shower detection and highlights the necessity of integrating such systems with particle detector arrays to enhance event discrimination.

Keywords: ultra high energy cosmic rays (UHECRs), extensive air showers (EAS), software-defined radio (SDR), cosmic ray detection, log-periodic dipole array antenna (LPDA), radio detection of cosmic rays.

INTRODUCCIÓN

Los rayos cósmicos son partículas elementales de altísima energía compuestas principalmente por protones (aproximadamente el 90 %), núcleos pesados (aproximadamente el 9 %) y fotones de muy alta energía [1]. Las lluvias cósmicas extensas (EAS, por sus siglas en inglés) generadas por las interacciones entre los rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECRs, por sus siglas en inglés) y la atmósfera terrestre, están compuestas por tres componentes principales [2]:

- La componente electromagnética, que incluye fotones, electrones y positrones, se origina principalmente por procesos de radiación de frenado conocidos como bremsstrahlung y por la producción de pares electrón-positrón a partir de fotones.
- La componente hadrónica, constituida por protones, neutrones y piones cargados que resultan de las colisiones inelásticas de los nucleones de los rayos cósmicos primarios con los núcleos de la atmósfera. Esta es la componente más energética, aunque se atenúa rápidamente en la atmósfera debido a interacciones secundarias y al decaimiento de piones y kaones.
- La componente muónica, formada principalmente por muones (μ^+ , μ^-) originados en la desintegración de piones y kaones de la componente hadrónica. Es la menos afectada por la absorción atmosférica y puede penetrar grandes espesores de material, siendo clave en la detección en experimentos subterráneos.

La componente electromagnética de las EAS genera señales de radiofrecuencia principalmente a través de dos mecanismos [3, 4]:

- Emisión geomagnética: producida por la deflexión de electrones y positrones en el campo magnético terrestre debido a la fuerza de Lorentz. Este es el mecanismo dominante; la intensidad de la señal electromagnética depende del ángulo geomagnético (α), es decir, del ángulo entre la dirección de la lluvia y el campo magnético terrestre.
- Efecto Askaryan: emisión debido a la separación de cargas en el frente de la lluvia. Este efecto es más relevante en medios densos como el hielo, y menos significativo en la atmósfera.



El experimento LOPES (LOFAR PrototypE Station) [5] implementó un arreglo de antenas para detección de rayos cósmicos. LOPES operó entre 2003 y 2013 dentro del experimento KASCADE-Grande, en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT), Alemania. Su objetivo principal fue evaluar la viabilidad de la detección digital de lluvias de rayos cósmicos mediante antenas de radio en un entorno con alto ruido electromagnético. LOPES desarrolló métodos innovadores de análisis interferométrico para reconstruir la dirección de llegada de las EAS, la energía del evento, entre otros [6]. Este experimento implementó una red de 30 antenas dipolo en forma de "V" invertida, alineadas en direcciones este-oeste y norte-sur, que operaban en el rango de 40-80 MHz, con un ancho de banda efectivo de 43-74 MHz. El sistema de adquisición de datos estaba sincronizado con los detectores de partículas de KASCADE-Grande, lo que permitía correlacionar directamente la señal de radio con la detección de partículas provenientes de las EAS.

LOPES fue el primer experimento digital que demostró la viabilidad de la detección de EAS mediante radiofrecuencia, validando los resultados previos obtenidos con detectores analógicos. Se observó una correlación directa entre la intensidad de la señal y el seno del ángulo geomagnético. Experimentos sucesivos, como LOFAR y AERA [7], han logrado mejorar la precisión de la técnica, la cual se ha consolidado como un método complementario a los detectores de partículas y telescopios ópticos, como en el Observatorio Pierre Auger [8].

El experimento CODALEMA (Cosmic Ray Detection Array with Logarithmic Electromagnetic Antennas por sus siglas en inglés) ha desarrollado un sistema autónomo para la detección de rayos cósmicos utilizando antenas logarítmicas periódicas. De este modo, se elimina la necesidad de un sistema de detección de partículas co-localizado, introduciendo algoritmos de auto-disparo (self-triggering) que maximizan la eficiencia del sistema a la hora de identificar eventos cósmicos [9].

Desde el 2012, el Observatorio Pierre Auger empezó con la detección de la componente electromagnética de fuentes externas usando antenas. Para este cometido se desarrollaron 3 prototipos [10]. El primer experimento desarrolló una antena en forma de lazo, de bajo coste de producción, pero también de baja recepción. A partir de este diseño, el dipolo se modificó a una adaptación tipo mariposa (butterfly antenna), optimizando así la recepción de la onda directa proveniente del sistema y de la onda reflejada, mejorando la detección. Esta adaptación permitió incrementar la sensibilidad y la capacidad de discriminación de las señales. Finalmente, se determinó que un único dipolo no era suficiente, y se construyeron antenas logarítmicas en las que cada elemento radiante contiene una porción del ancho de banda [10, 11].

Si bien diversos experimentos han demostrado que los arreglos de antenas de radiofrecuencia pueden ampliar la capacidad de detección de rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECRs) de los detectores de superficie especializados en la componente muónica, como los del Observatorio Pierre Auger, aún no se ha determinado si esta técnica puede ofrecer resultados equivalentes en un arreglo descentralizado de detectores instalados en diferentes latitudes y, por tanto, expuestos a distintas características del campo magnético terrestre, como es el caso de los detectores Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en inglés) de la Colaboración LAGO [12].



Otro aspecto que requiere investigación es el impacto que podrían tener los nuevos sistemas digitales de detección de ondas, como la radio definida por software (SDR) [13], en el desempeño de los sistemas de detección de lluvias atmosféricas extensas (EAS) basados en antenas, en comparación con las cadenas de procesamiento de señal analógicas utilizadas en los experimentos mencionados en esta sección.

Todas las investigaciones mencionadas comparten un aspecto en común: no se enfocan en el diseño de la antena en sí, lo que genera confusión o proporciona información incompleta al lector que desee replicar los experimentos bajo otras condiciones. Del mismo modo, tampoco se detalla claramente cómo debe realizarse el tratamiento de las señales registradas.

El objetivo de esta investigación es el de realizar un prototipo de antena especializada para la detección de la componente electromagnética de rayos cósmicos, basado en los diseños del Observatorio Pierre Auger, y modificar el sistema de procesamiento y adquisición de señales usando dispositivos definidos por software.

Sistemas SDR

Los sistemas SDR han revolucionado múltiples campos de la tecnología al permitir la transmisión y recepción de señales de radio de muy diversas características, sin necesidad de modificar el hardware, lo que los hace altamente adaptables a múltiples aplicaciones [14]. En el ámbito de las telecomunicaciones inalámbricas, son esenciales para el desarrollo de tecnologías emergentes como 5G, ya que facilitan la experimentación con distintos protocolos de comunicación y la optimización del uso del espectro radioeléctrico. Asimismo, son clave en la implementación de redes de radio cognitiva, permitiendo la detección y uso eficiente de bandas de frecuencia disponibles para mejorar la conectividad en entornos de alta demanda [15].

En el sector de la defensa y seguridad, los sistemas SDR han demostrado ser herramientas esenciales en guerra electrónica, proporcionando capacidades avanzadas para el análisis y bloqueo de señales hostiles en tiempo real. Además, su uso en radares de vigilancia y sistemas de inteligencia de señales (SIGINT) ha permitido la detección de transmisiones sospechosas y la mejora en la seguridad de infraestructuras críticas. En el ámbito de la navegación y geolocalización, han sido empleados en el desarrollo de receptores Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) reconfigurables, lo que posibilita el estudio y mejora de la optimización de sistemas de posicionamiento satelital y su integración en aplicaciones como vehículos autónomos y navegación aérea [16].

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de la antena

El diseño de una antena de dipolo periódica logarítmica se sustenta en la estrecha relación entre sus parámetros electromagnéticos y su geometría física. En la Tabla 1 se presentan los parámetros electromagnéticos necesarios para una detección correcta:

TABLA 1. Parámetros de diseño de la antena implementada.

Ancho de banda BW (MHz)	(20 – 80) +/- 10%
Coefficiente de reflexión S_{11} (dB)	< -10.
Ganancia G (dB)	> 6
Impedancia: Z (Ω)	75

La Tabla 2 resume los parámetros geométricos derivados del proceso de diseño. El método de diseño de la antena se basa en el descrito en [17,18]. De forma general, una antena logarítmica se define a partir de la ganancia, la cual está en función de los parámetros de factor de escala (τ) y espaciado relativo (σ). A partir de esto y de las fórmulas predeterminadas se generan los parámetros de diseño, que, junto con las dimensiones de los elementos y las distancias entre ellos, se detallan en las Tablas 2 y 3.

TABLA 2. Parámetros fundamentales para el diseño de una antena de dipolo periódica logarítmica.

Parámetro	Valor
Factor de escala (τ)	0.8
Espaciado relativo (σ)	0.143
Ángulo de triangulación superior (α)	19.27°
Ancho de banda región activa (B_{ar})	1.98
Ancho de banda deseado (B)	4.98
Ancho de banda designado (B_d)	9.68
Número de elementos (N)	11
Altura final de antena (m)	4.64

Estos parámetros geométricos fueron determinados mediante métodos analíticos estándar en el diseño de antenas logarítmicas, buscando optimizar la cobertura del rango de frecuencias especificado en BW, cumpliendo simultáneamente con las condiciones de ganancia y adaptación requeridas.

TABLA 3. Longitud de los dipolos y distancia entre los elementos de la LPDA obtenidos usando los parámetros de la Tabla 1.

Identificador del dipolo	Longitud (m)	$d(i, i+1)$ (m)
l_1	8.33	2.34
l_2	6.66	1.86
l_3	5.33	1.50
l_4	4.26	1.19
l_5	3.41	0.95
l_6	2.73	0.77
l_7	2.18	0.60
l_8	1.75	0.49
l_9	1.40	0.41
l_{10}	1.11	0.31
l_{11}	0.89	-

Estos resultados fueron verificados utilizando el software libre Log-Periodic Dipole Array Calculator [19], el cual permite diseñar una antena LPDA a partir de parámetros de frecuencia, impedancia y constantes τ y σ , corroborando así los cálculos realizados previamente.

Simulación de la antena

Para la simulación de la antena se utilizó el software ANSYS [20]. La Figura 1 presenta la antena modelada a partir de las longitudes de la Tabla 3, colocada en un ambiente de vacío (sin interferencias electromagnéticas), excitada a una impedancia de 75Ω .

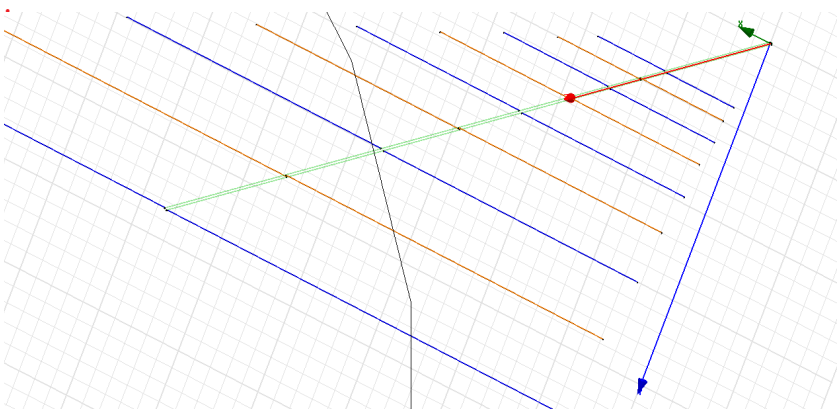


FIGURA 1. Modelamiento de la antena logarítmica en ANSYS.



La Figura 2 muestra los resultados del coeficiente de reflexión que tiene la antena simulada. Para que una frecuencia funcione, este parámetro se debe encontrar por debajo de los -10 dB. Por este motivo, al analizar la imagen, entre 20 y 110 MHz, la antena se encuentra óptima para que funcione.

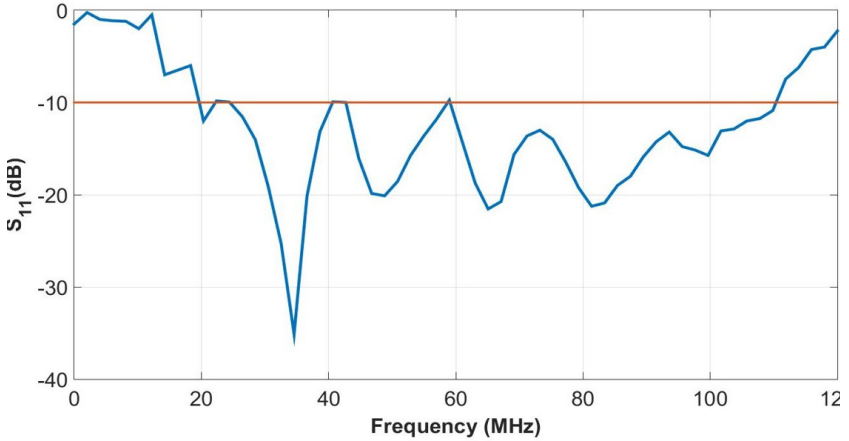


FIGURA 2. Coeficiente de reflexión S_{11} obtenido en simulación.

La Figura 3 muestra la impedancia característica que posee cada frecuencia. Dadas las características de las líneas de transmisión disponibles en el mercado, la antena ha sido diseñada para operar a 75 Ω , de modo que este parámetro se aproxima tanto en su parte real como en la imaginaria.

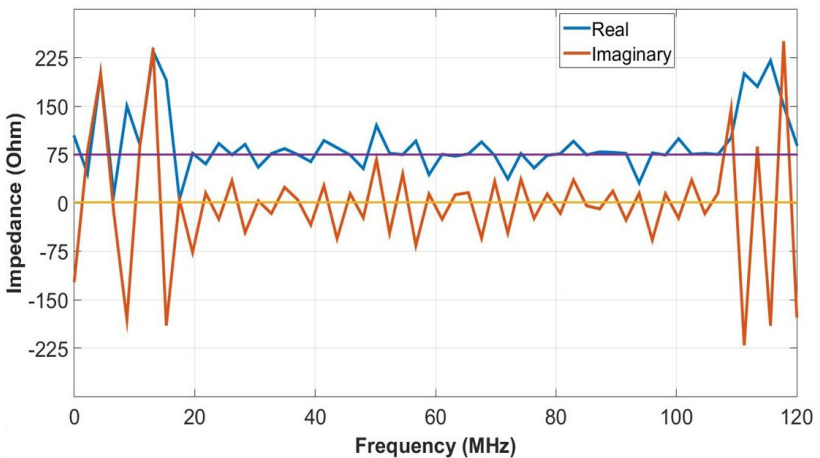


FIGURA 3. Impedancia característica de la antena.

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

De forma general, al implementar antenas logarítmicas es habitual que ciertos dipolos no participen activamente en la radiación o recepción, debido a su falta de resonancia respecto a la frecuencia de operación. Para esta investigación se optó por omitir los elementos l_1 , l_2 , l_{10} y l_{11} , ya que no contribuyen significativamente a la radiación efectiva dentro de la banda de operación. Este enfoque es consistente con estudios previos, los cuales indican que la optimización del número de dipolos en la región activa puede mejorar la eficiencia de la antena sin comprometer su rendimiento [21]. Las Figuras 4, 5 y 6 presentan los resultados de la simulación de la antena optimizada, en lo que compete al coeficiente de reflexión, impedancia y ganancia.

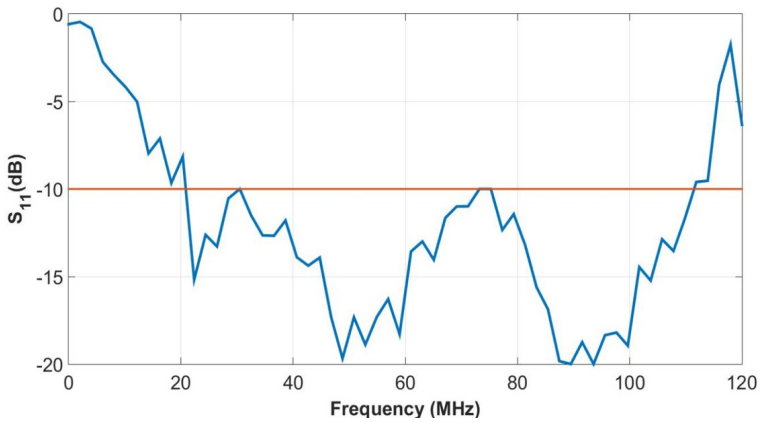


FIGURA 4. Coeficiente de reflexión S_{11} de la antena optimizada a 7 dipolos.

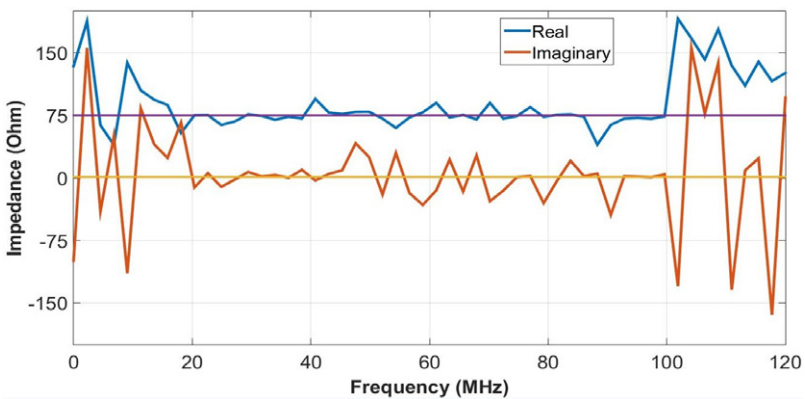


FIGURA 5. Impedancia característica de la antena optimizada en simulación.

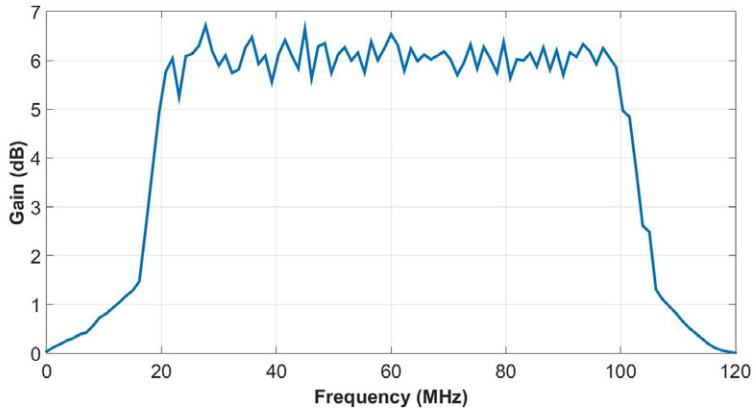


FIGURA 6. Ganancia de la antena en simulación.

Las dimensiones de los dipolos implementados y las distancias entre ellos se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4. Dimensiones de los dipolos para la LPDA optimizada y distancia entre los elementos, con $i = 1 \dots 6$.

Número de dipolo	Longitud (m)	$d(i, i+1)$ (m)
l_1	5.00	1.26
l_2	4.00	1.00
l_3	3.2	0.80
l_4	2.56	0.64
l_5	2.00	0.53
l_6	1.56	0.43
l_7	1.28	-

Construcción e instalación de la antena

Instalamos la antena en la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Riobamba, Ecuador), con coordenadas geográficas de latitud y longitud de -1.655423 , -78.676594 .

En la Figura 7 se muestra el trabajo final de la antena instalada capturando muestras en tiempo real.



FIGURA 7. Instalación de la antena logarítmica y pruebas iniciales de funcionamiento.

Pruebas de funcionamiento

El analizador de espectros Anritsu permite visualizar la respuesta en frecuencia de la señal recibida por la antena LPDA. Dado que su rango de operación se encuentra entre 20 y 80 MHz, se observa interferencia causada por los servicios de radio y televisión que operan en la misma banda de frecuencias. La Figura 8 muestra la primera medición del espectro obtenida con la antena instalada.

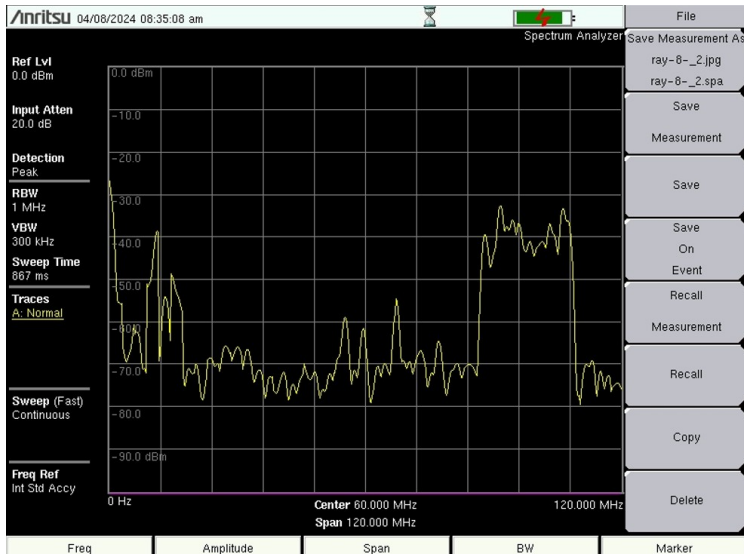


FIGURA 8. Espectro de recepción de la antena LPDA.

Adquisición de datos con el sistema SDR

El sistema de adquisición de señales se basa en un receptor USRP N310 que se conecta a la antena mediante un cable coaxial con conectores SMA. Este microprocesador es responsable de recibir, amplificar y filtrar las señales de la antena antes de su digitalización en tiempo real. Finalmente, a través de MATLAB se aplica la herramienta de auto-disparo (self-triggering) con el fin de poder detectar picos relevantes para su posterior análisis. La Figura 9 ilustra la arquitectura del sistema.

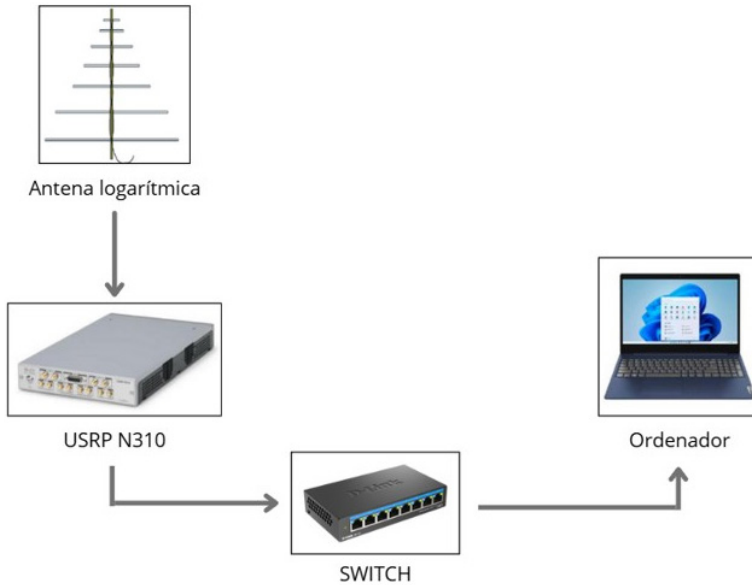


FIGURA 9. Sistema de adquisición automatizada de datos.

Parámetros de configuración iniciales

En el ordenador, es necesario cambiar la dirección IP de asignación automática a manual, debido a que la USRP N310 viene con una dirección IP predeterminada (generalmente 192.168.10.x).

En MATLAB, se busca por nombre el soporte "Wireless Testbench Support Package for NI USRP Radios", como se visualiza en la Figura 10.

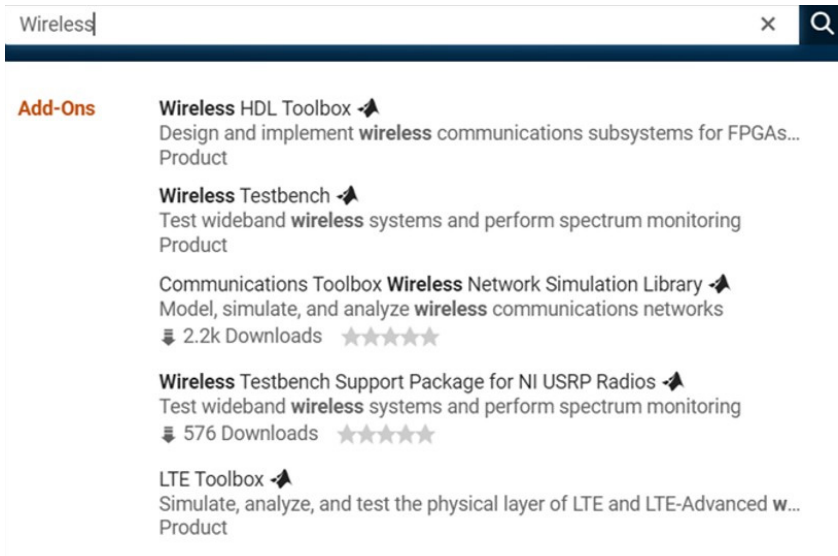


FIGURA 10. Soporte de radio para USRP.

Una vez realizados todos los pasos del proceso de instalación, se comprueba que todos los marcadores aparezcan en color verde para la verificación correcta de todos los componentes, como se indica en la Figura 11. Este proceso toma unos minutos dependiendo de las características de procesamiento del ordenador.

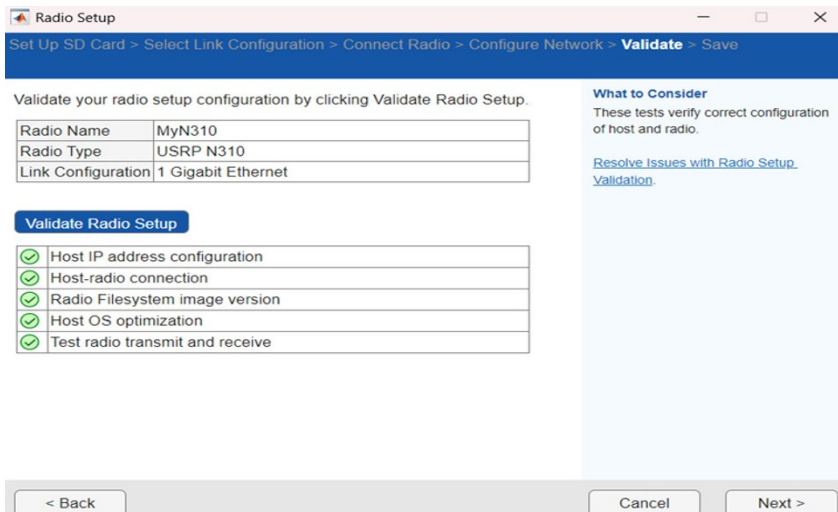
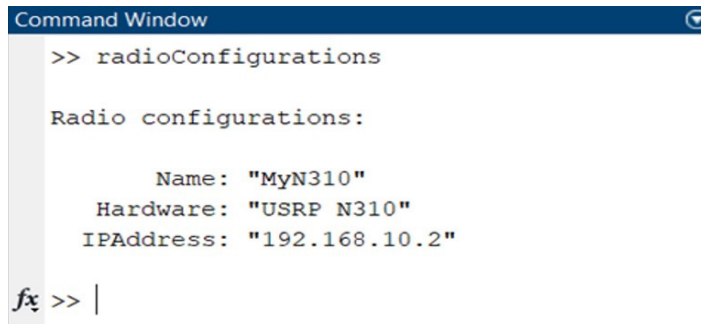


FIGURA 11. Validación de componentes de radio.

Una vez instalada la extensión para la interconexión entre Matlab y la USRP N310, se puede escribir en la pestaña de comandos "radioConfigurations" como se muestra en Figura 12. Este paso verifica que la USRP N310 está siendo reconocida correctamente por el entorno de Matlab.



```
Command Window  
>> radioConfigurations  
  
Radio configurations:  
  
    Name: "MyN310"  
    Hardware: "USRP N310"  
    IPAddress: "192.168.10.2"  
  
fx >> |
```

FIGURA 12. Comando "radioConfigurations".

Umbral de detección

Con base en la señal que se recibe en tiempo real, en investigaciones previas y en la capacidad de muestreo de la USRP, se definió un umbral de recepción de -35 dB. Por tanto, los valores inferiores a este, corresponden a ruido Gaussiano, el cual está siempre presente en todo el espectro electromagnético, además de interferencias de baja intensidad que no aportan información significativa al análisis.

Tiempo de detección

Los datos recopilados por el sistema se almacenaron dentro de un periodo de 3 meses, desde el jueves 13 de octubre de 2024 hasta el 17 de diciembre de 2024 durante 24 horas y con una frecuencia de muestreo de 1 segundo, descartando fines de semana, días festivos y periodos de descanso institucional. En total, se obtuvieron muestras correspondientes a 47 días de medición.

La Figura 13 muestra el diagrama de flujo del programa. En la etapa de análisis se identifican los picos en el espectro que superan un umbral de -35 dB.

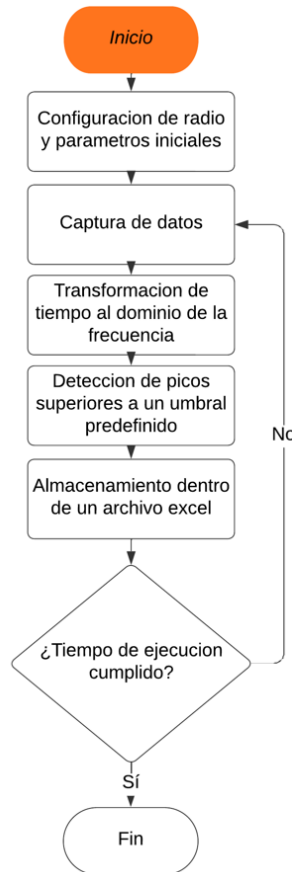


FIGURA 13. Diagrama de flujo del algoritmo para la toma de datos.

DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

Fase 1: Configuración inicial del sistema

- Se recuperan las configuraciones guardadas del dispositivo de radio.
- Se define la banda de frecuencia de operación: 20 MHz a 120 MHz.
- Se calcula la frecuencia central para centrar el receptor en la mitad del ancho de banda.
- Se inicializa el objeto *basebandReceiver* (*bbrx*) si no existe, con parámetros como:
 - Frecuencia central
 - Tasa de muestreo de 125 MHz
 - Ganancia de radio de 30 dB
 - Selección de antena



Fase 2: Definición de parámetros de captura

- Se establece la duración de operación: 8 horas.
- Se define la cantidad máxima de picos a capturar: $\text{picos_por_hora} * \text{duración_horas}$.
- Se crea una tabla preasignada para almacenar los picos detectados.
- Se definen las siguientes variables de control:
 - Hora de inicio y fin del monitoreo.
 - Intervalo de guardado en disco (1 minuto).
 - Intervalo de reconexión del receptor (1 hora).

Fase 3: Preparación del entorno de almacenamiento

- Se genera el nombre del archivo Excel usando un *timestamp* basado en la hora de inicio.
- Se verifica la existencia del directorio de destino, y se lo crea si no existe.

Fase 4: Bucle principal de adquisición

- Se ejecuta un bucle *while* hasta que se cumpla el tiempo límite o se alcance el número máximo de picos.
- Dentro del bucle:
 1. Se realiza una reconexión periódica de bbrx cada hora para evitar errores acumulativos.
 2. Se capturan los datos con *capture* (bbrx, bufferSize) dentro de un bloque *try-catch* para gestionar posibles errores.
 3. Se calcula el espectro de potencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).
 4. Se genera un gráfico del espectro en tiempo real.

Fase 5: Detección y almacenamiento de picos

- Se aplica la función *findpeaks* al espectro con un umbral mínimo de -30 dB explicado anteriormente.
- Se filtran los picos que se encuentren entre 20 y 58 MHz.
- Si hay espacio en la tabla, los datos de frecuencia y potencia de cada pico se almacenan junto con:
 - Fecha y hora del evento en formato *string*.

Fase 6: Almacenamiento periódico de datos

- Cada minuto (*intervalo_guardado*), la tabla de picos se escribe en un archivo Excel.
- Se actualiza la variable de tiempo *siguiente_guardado* para la próxima escritura.

Fase 7: Finalización

- Una vez cumplido el tiempo o el número máximo de muestras, el bucle se detiene.
- Se muestra un mensaje de cierre: 'El proceso ha finalizado o se ha alcanzado el límite de capacidad.'



La Figura 14 muestra el espectro de la señal capturada en el rango de frecuencias de 20 MHz y 120 MHz. La potencia de la señal es expresada en decibeles (dB). En primera instancia, se observa una variabilidad significativa en la amplitud a lo largo de las bandas de frecuencia, lo que sugiere la presencia de diferentes fuentes de emisión y posibles interferencias en el entorno de medición.

En la banda de 20 MHz a aproximadamente 70 MHz, se identifica una disminución progresiva de la magnitud, alcanzando valores por debajo de -50 dB, lo que indica una menor presencia de señales en este rango. Sin embargo, a partir de los 80 MHz se evidencia un incremento abrupto en la magnitud de la señal, alcanzando valores cercanos a -25 dB, con una alta densidad de picos. Esto se debe a la presencia de emisoras de radio que utilizan las bandas de frecuencias que van desde 87 MHz hasta los 108 MHz.

Por lo tanto, al comparar las Figuras 8 y 14, se confirma que el sistema está configurado correctamente.

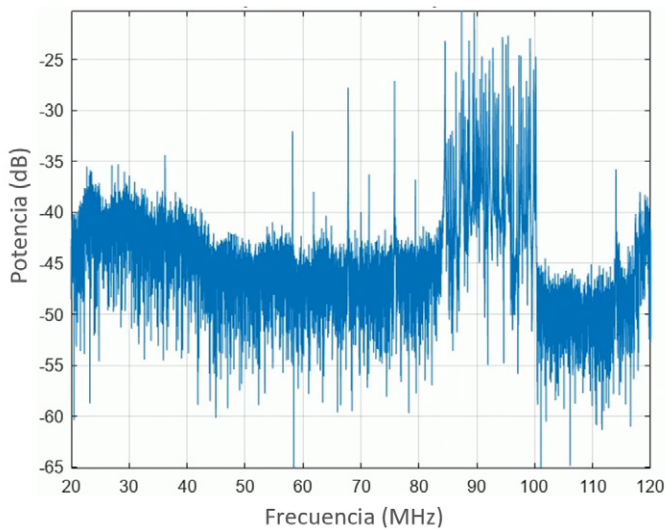


FIGURA 14. Espectro de recepción de la antena procesada con MATLAB.

RESULTADOS

Como primeros resultados preliminares se puede observar en la Figura 15 el espectro que se está receptando en el ancho de banda de 0 a 120 MHz, con una frecuencia central de 60 MHz, y una tasa de muestreo de 120 MHz. Una vez que se ha realizado una primera recepción de datos es necesario discriminar las bandas de trabajo ya reservadas.

A partir de los 70 MHz se visualiza una porción de ancho de banda funcionando, ya que son las frecuencias correspondientes a las bandas emisoras de FM, Banda I de TV o Radioaficionados. Dado que el estudio se encuentra en el rango de los 20 a 80 MHz, se

pueden observar ligeros picos de potencia a 55.42 MHz aproximadamente, indicando cómo se está recepcionando la componente electromagnética de fuentes no intencionales.

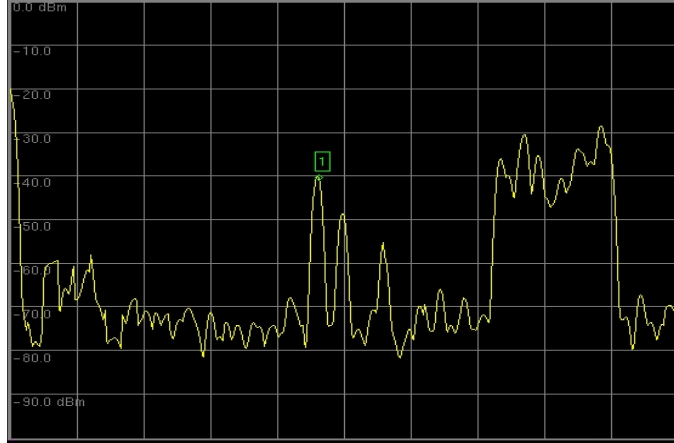


FIGURA 15. Primera toma del espectro de 0 – 120 MHz.

Sin embargo, para una correcta validación de los resultados, es necesario tomar mediciones del espectro en un tiempo establecido y determinar en qué horario y a qué frecuencia se detectó la componente. Para este trabajo de investigación se recolectaron muestras durante la semana del 8 al 12 de abril 2024, desde las 8h00 am hasta las 19h00, en periodos de 30 minutos de forma manual. La Figura 16 muestra el espectro captado del 8 de abril a las 10:06 am.

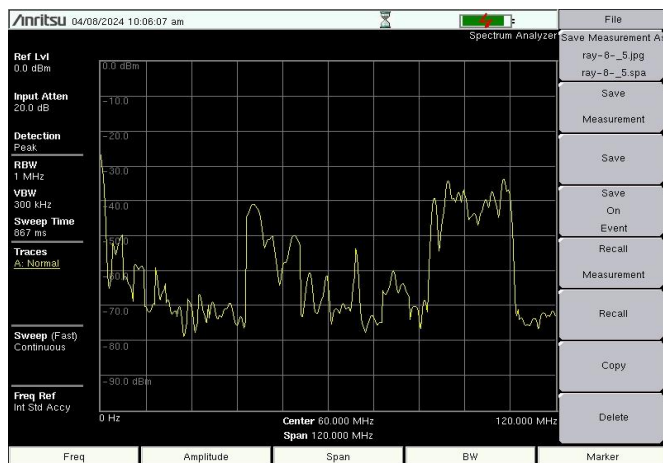


FIGURA 16. Toma periódica del espectro.



Al comparar el espectro de la Figura 15 con el de la Figura 16, se observa la aparición de una fuente no intencional en torno a los 40 MHz, por lo que se concluye que estas muestras no son constantes, sino que presentan cortos períodos de tiempo durante los cuales pueden visualizarse y registrarse.

Para una mejor interpretación de los datos, estos se tabularon en gráficos de barras. A continuación, se muestran los resultados en las Figuras 17, 18, 19 y 20 representando la cantidad de muestras obtenidas por hora, por ancho de banda y por potencia respectivamente, adicionalmente de realizar una relación del promedio de la potencia recibida en función del ancho de banda.

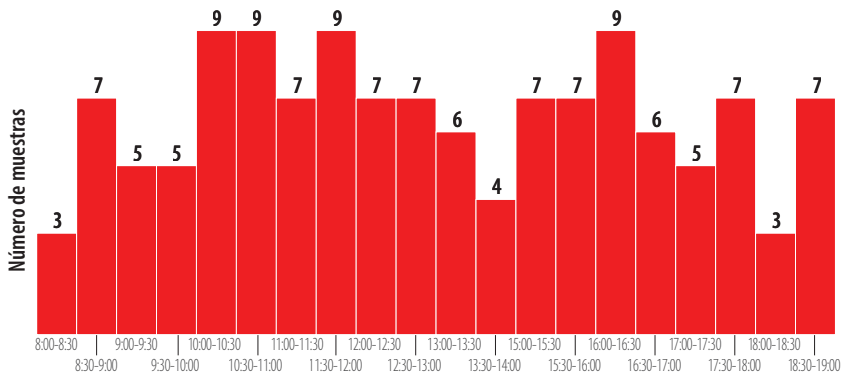


FIGURA 17. Cantidad de muestras obtenidas por hora.

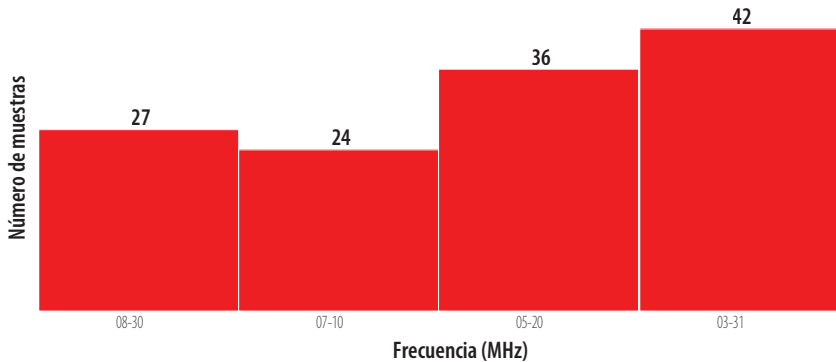


FIGURA 18. Cantidad de muestras obtenidas por ancho de banda.

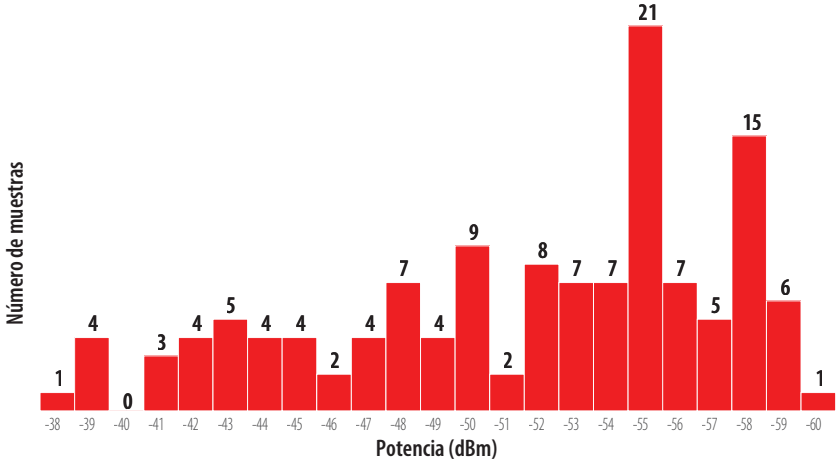


FIGURA 19. Cantidad de muestras obtenidas por potencia.

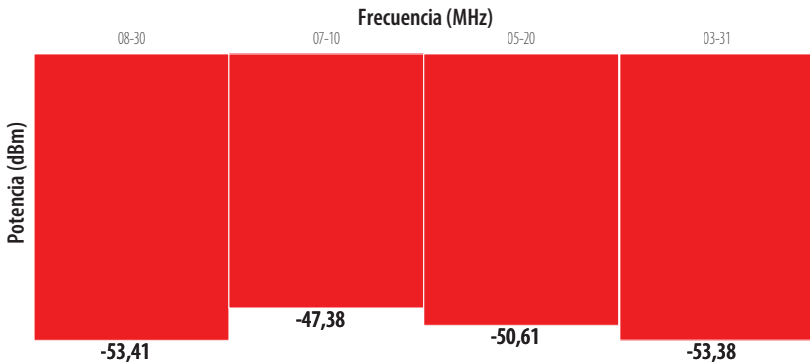


FIGURA 20. Potencia promedio obtenida por ancho de banda.

Al analizar las muestras obtenidas con el analizador de espectros, se observa que la detección de partículas en el rango de 20–40 MHz es escasa. Solo se registró una muestra el primer día, coincidiendo los horarios de 10:00–11:00 a.m. y 5:00 p.m. como los periodos con mayor actividad. El 10 de abril fue el día con mejores resultados, obteniéndose cuatro muestras, aunque bastante separadas entre sí.

En cambio, en el rango de 40–60 MHz se aprecia una diferencia notable, ya que se comienza a observar una mayor concentración de rayos cósmicos durante la mayor parte del tiempo. Los intervalos de 10:00–11:00 a.m. y 4:00–5:00 p.m. fueron los periodos en los que se registraron detecciones de forma consistente en todos los días de medición.

Resultados de la automatización de tomas de datos

El sistema se ejecutó durante 47 días, desde el 13 de octubre hasta el 17 de diciembre de 2024, operando de forma continua las 24 horas del día con una frecuencia de muestreo de 1 segundo. El objetivo fue registrar posibles eventos astronómicos previstos, como llamaradas solares o la lluvia de meteoros Gemínidas. En la Figura 21 se muestra en detalle la cantidad de muestras recolectadas por día.

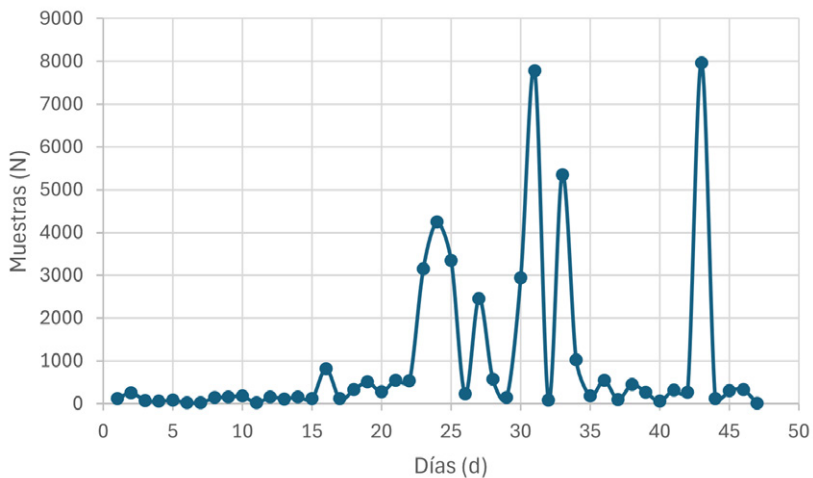


FIGURA 21. Fechas y cantidad de datos recolectados.

Una vez concluida la recolección de datos durante el periodo de tiempo definido, se ejecuta el análisis estadístico con la ayuda de tablas y gráficos dinámicos en Excel para una mayor agilidad y precisión en el método de tabulado.

La Figura 22 indica en un diagrama de barras las muestras agrupadas en función a la hora en las que fueron registradas. De manera gráfica se puede afirmar que las horas con más presencia de rayos cósmicos son de entre 11:00 am y 12 pm, con un total de 6956 y 6157 picos respectivamente. En las horas de la mañana existe menos radiación en comparación a las de la noche.

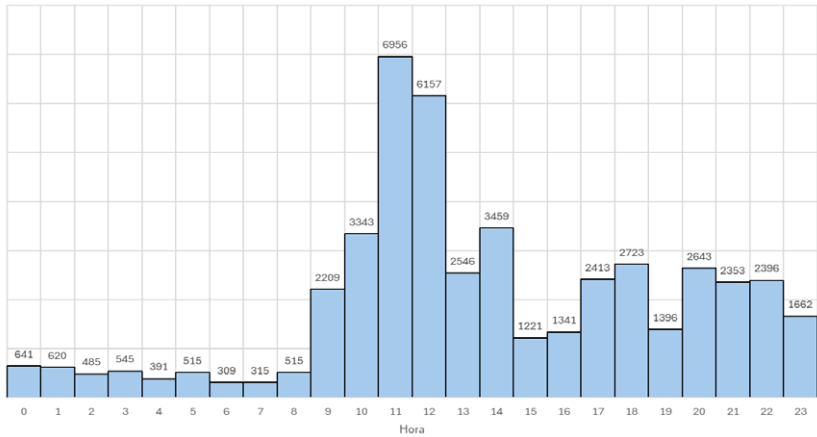


FIGURA 22. Número de muestras por hora.

A continuación, se analizan los datos en función a la frecuencia en la que fueron registradas. En la Figura 23 se aprecia que las bandas de frecuencias más frecuentes son de entre 20-21 MHz y 23-24 MHz con valores de 7 407 y 9 071 muestras respectivamente. En las de 21-22, 24-27 MHz hay una relativa similitud aparente en la caída de rayos. Las bandas de 28 a 31 MHz y 33 a 36 MHz registraron poca presencia de radiación. La banda de 32 MHz presenta una subida respecto a sus bandas vecinas y el resto de las bandas de 37 a 55 MHz no recibieron más información, por ello no fueron consideradas.

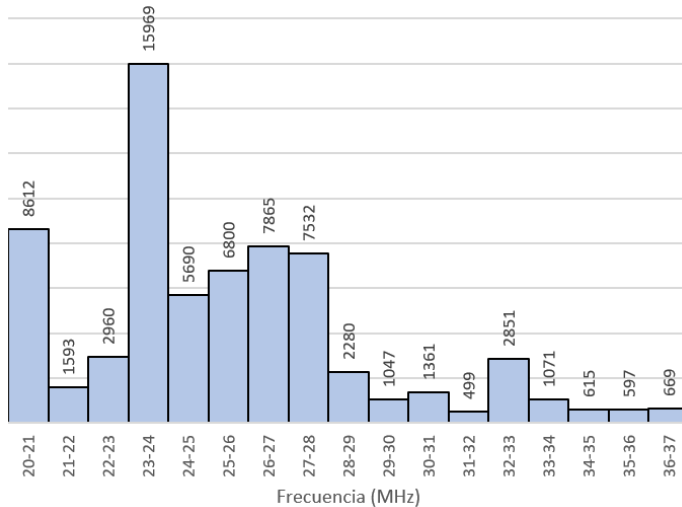


FIGURA 23. Número de muestras por frecuencia (MHz).

La Figura 24 muestra la distribución de la cantidad de muestras por potencia medida en decibelios. Se observa que el rango de potencia entre -30 y -29 dBm tiene la mayor



cantidad de muestras, con un pico de 17 707, seguido del rango entre -32 y -31 dBm con 14 952 muestras. A medida que la potencia se aleja de estos valores centrales hacia ambos extremos, la cantidad de muestras disminuye significativamente, lo que sugiere que las señales más comunes están concentradas en un rango intermedio de potencias. Los valores extremos, tanto más bajos (-35 a -34 dBm) como más altos (-19 a -18 dBm), presentan una frecuencia considerablemente menor, con apenas unas decenas de muestras. Esto indica que las señales con potencias fuera del rango central son menos representativas en este conjunto de datos.

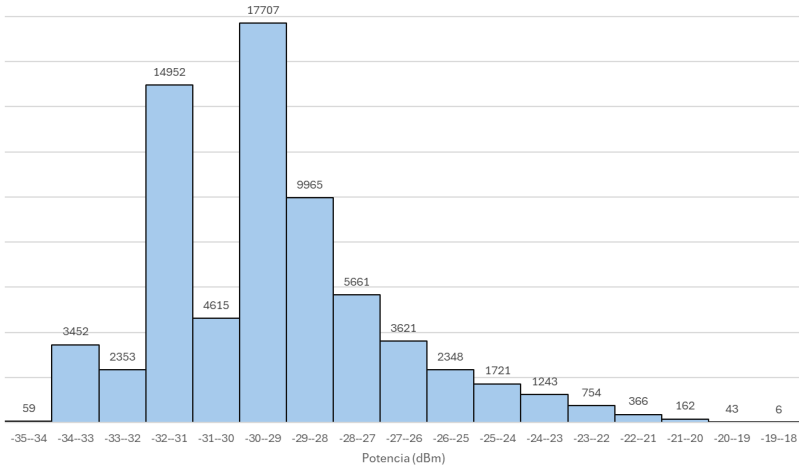


FIGURA 24. Número de muestras por potencia (dBm).

El gráfico de la Figura 25 muestra el promedio de la intensidad de potencia, medida en decibelios (dB), para cada banda de frecuencia entre 22 MHz y 37 MHz, rango en el cual se registró una cantidad significativa de muestras. Se identifican picos máximos en las bandas de 28–29 MHz, 30–31 MHz y 32–33 MHz, con valores de potencia de -29.11 dB, -28.98 dB y -28.29 dB, respectivamente. Estos resultados evidencian la presencia de regiones con una mayor concentración de potencia dentro del espectro analizado.

De manera opuesta, los mínimos relativos se observan en los rangos de 25–26 MHz (-30.10 dB), 26–27 MHz (-29.98 dB), 28–29 MHz y 35–36 MHz (-30.17 dB), lo que indica una menor recepción de potencia en dichas bandas de frecuencia.

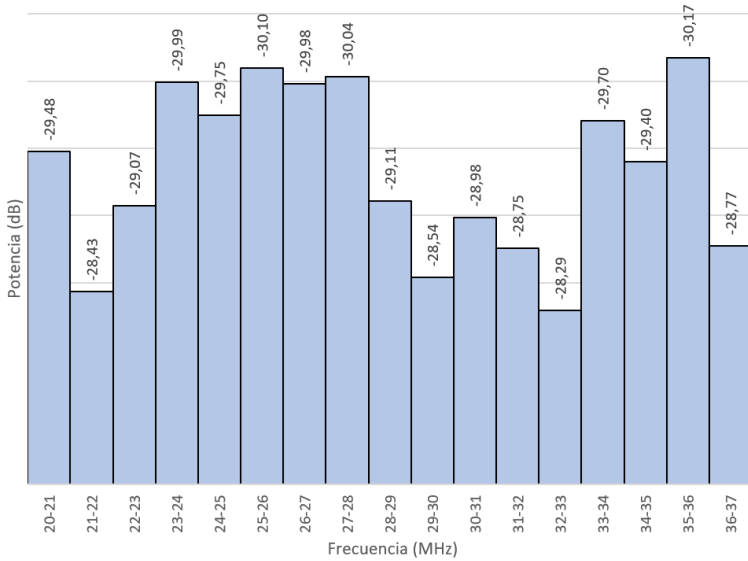


FIGURA 25. Potencia en función a la frecuencia.

DISCUSIÓN

Al analizar las antenas empleadas en el Observatorio Pierre Auger, se observó que sus dimensiones son significativamente mayores en comparación con las diseñadas en la presente investigación. En dichas antenas, los dipolos se instalan de forma cruzada, es decir, orientados en ambos sentidos, mientras que en este trabajo se optó por una orientación unidireccional.

Asimismo, se identificó que la ganancia de las antenas del Observatorio Pierre Auger no se mantiene uniforme a lo largo de todo el ancho de banda. En contraste, en el diseño propuesto en esta investigación se logró una ganancia estable dentro del rango de operación, tal como se muestra en la Figura 6, optimizando así el desempeño de la antena. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en la simulación [22].

Con base en los estudios desarrollados previamente por otros grupos de investigación, se observó que uno de los aspectos más relevantes que suelen omitirse es la falta de un criterio claro para determinar si la señal capturada proviene de una fuente intencional o no intencional. La presente investigación representa un primer avance en la definición de un método para el tratamiento de la componente electromagnética de los rayos cósmicos y en el establecimiento de un umbral de detección adecuado. Cabe destacar que, tanto al emplear el analizador de espectros como la radio definida por software (SDR), las señales registradas resultan casi imperceptibles; por ello, el hecho de haber logrado un muestreo exitoso con tiempos de captura tan reducidos constituye un avance significativo en la detección de estos espectros de baja intensidad.



Análisis comparativo con otros estudios

Este artículo se centra en la detección de rayos cósmicos de ultra alta energía a partir del estudio de las señales de radio emitidas por las lluvias atmosféricas extensas que se generan cuando un rayo cósmico impacta la atmósfera. A diferencia de los métodos tradicionales de detección, que se basan en telescopios de fluorescencia y detectores de partículas en superficie, como los utilizados en el Observatorio Pierre Auger en Argentina, la detección por radio permite una observación continua, independiente de las condiciones climáticas, y ofrece una cobertura geográfica mucho más amplia.

En este contexto, se propone un enfoque de automatización de la detección mediante un sistema de auto-disparo, en el que el detector de radiofrecuencia analiza de manera continua el entorno y decide almacenar datos cuando detecta señales que cumplen ciertos criterios predefinidos, como una intensidad anómala o un patrón específico en la frecuencia. Este sistema tiene como objetivo principal filtrar en tiempo real las señales relevantes y discriminar el ruido electromagnético, permitiendo la adquisición autónoma de datos. No obstante, la validación de los eventos requiere información adicional recopilada por detectores de partículas. Los datos obtenidos se almacenan en hardware embebido, lo que facilita su procesamiento posterior en servidores centralizados.

A continuación, en la Tabla 5 se muestra la comparación con puntos clave entre cada uno de los sistemas mencionados.

TABLA 5. Comparación de las características principales de los sistemas de detección de partículas basados en antenas y el prototipo desarrollado.

Criterio comparativo	Soluciones basadas en hardware especializado	Infraestructura LOFAR y procesamiento	Propuesta del presente estudio
Método de detección	FPGA con auto-disparo y validación con detectores de partículas	Algoritmo de auto-disparo optimizado para antenas LOFAR	SDR con filtrado digital en MATLAB
Estrategia de muestreo y disparo	Activación solo cuando hay eventos detectados	Disparo en tiempo real basado en picos de intensidad	Toma de datos cada 1 segundo.
Procesamiento de señal	FPGA con filtrado pasivo de alto orden	Filtrado de RFI basado en coincidencias de antenas y umbrales	MATLAB con FFT y análisis en PC estándar
Almacenamiento de datos	En hardware embebido especializado	En servidores LOFAR con acceso centralizado	En PC estándar, archivos Excel, accesible
Tipo de antenas	LPDA y SALLA (más costosas y requieren calibración constante)	LOFAR LBA (requiere una infraestructura extensa y costosa)	Logarítmicas diseñadas localmente (económicas y eficientes)
Costo de implementación	Alto	Muy alto por estación LOFAR	Bajo



Criterio comparativo	Soluciones basadas en hardware especializado	Infraestructura LOFAR y procesamiento	Propuesta del presente estudio
Mantenimiento	Alto, necesita ajustes en FPGA y sensores de partículas	Muy alto, depende de infraestructura LOFAR	No requiere calibraciones constantes
Flexibilidad y escalabilidad	Depende de FPGA y sensores de partículas	Solo funciona en LOFAR	Adaptable a distintos entornos y bajo costo
Adaptabilidad a otros entornos	Difícil, requiere hardware especializado	Solo aplicable a LOFAR, difícil de trasladar a otros sistemas	Fácil de replicar y adaptar

CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó que las antenas logarítmicas desarrolladas permiten una cobertura de recepción adecuada para fuentes no intencionales dentro del ancho de banda analizado, comprendido entre 20 y 80 MHz. Durante las mediciones realizadas con el analizador de espectros se excluyeron las frecuencias asignadas a usos comerciales, como las de televisión y radio. En el rango restante se identificaron componentes electromagnéticas asociadas a los rayos cósmicos, principalmente entre 40 y 60 MHz. Estos resultados confirman el correcto funcionamiento y la eficacia de las antenas diseñadas.

La implementación de un sistema de adquisición de datos automático permitió recolectar un volumen de muestras significativamente mayor al que se podría obtener mediante registros manuales. Este sistema no solo incrementa la cantidad de información disponible, sino que también mejora la precisión de los parámetros de tiempo, amplitud y frecuencia, garantizando una operación continua y estable durante periodos prolongados.

La información obtenida a partir del análisis de las señales detectadas por las antenas constituye una herramienta valiosa para aumentar la capacidad de discriminación de eventos en los detectores de partículas, como los tanques Cherenkov instalados en la ESPOCH. En una siguiente etapa de la investigación se tiene previsto realizar una campaña conjunta de adquisición de señales entre las antenas y los detectores Cherenkov (WCD), con el objetivo de distinguir de manera más efectiva las señales provenientes de rayos cósmicos respecto de otras fuentes electromagnéticas no intencionales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Electrónica e Informática de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) por brindarnos las facilidades de uso de equipos y materiales para el desarrollo de este trabajo.



CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Henry Mayorga Pérez: recursos, investigación, validación (encargado de la manufacturación de la antena, participó en la implementación y verificación física del dispositivo). Amagua Romero: software, curación de datos, visualización (encargado de la automatización de los datos, desarrollo del sistema de adquisición y procesamiento). Hugo Moreno Avilés: conceptualización, metodología, análisis formal (responsable del diseño teórico de la antena y planteamiento del modelo base de funcionamiento).

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores no utilizaron ningún uso de tecnologías de IA generativa y asistida de redacción.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles previa solicitud al autor correspondiente, en casos excepcionales.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés en relación con la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Auger, P., Abraham, J., Abreu, P., Aglietta, M., Aguirre, C., J. A. E., Allard, D., Allekotte, I., Allen, J., Alvarez-Muñiz, J., Ambrosio, M., Anchordoqui, L., Andringa, S., Anzalone, A., Aramo, C., Arganda, E., Argirò, S., Arisaka, K., Arneodo, F., & Arqueros, F. (2025). *The cosmic ray energy spectrum and related measurements with the Pierre Auger Observatory*. *arXiv:0906.2189*. <https://arxiv.org/abs/0906.2189>
- [2] Huege, T. (2016). Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era. *Physics Reports*, 620, 1–52. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.02.001>
- [3] Falcke, H., Apel, W. D., Badea, A. F., Bähren, L., Bekk, K., Bercuci, A., Bertaina, M., Biermann, P. L., Blümer, J., Bozdog, H., Brancus, I. M., Buitink, S., Brüggemann, M., Buchholz, P., Butcher, H., Chiavassa, A., Daumiller, K., De Bruyn, A. G., De Vos, C. M., . . . & Zimmermann, D. (2005). Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers. *Nature*, 435(7040), 313–316. <https://doi.org/10.1038/nature03614>
- [4] Schröder, F. G. (2017). Radio detection of cosmic-ray air showers and high-energy neutrinos. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 93, 1–68. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2016.12.002>
- [5] Huege, T., Apel, W. D., Arteaga, J. C., Asch, T., Bähren, L., Bekk, K., Bertaina, M., Biermann, P. L., Blümer, J., Bozdog, H., Brancus, I. M., Buchholz, P., Buitink, S., Cantoni, E., Chiavassa, A., Daumiller, K., de Souza, V., Doll, P., Engel, R., . . . & Zensus, J. A. (2012). The LOPES experiment—Recent results, status and perspectives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 662. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.081>
- [6] Apel, W. D., Arteaga-Velázquez, J. C., Bähren, L., Bekk, K., Bertaina, M., Biermann, P. L., Blümer, J., Bozdog, H., Cantoni, E., Chiavassa, A., Daumiller, K., De Souza, V., Di Pierro, F., Doll, P., Engel, R., Falcke, H., Fuchs, B., Gemmeke, H., Grupen, C., . . . Zensus, J. A. (2021). Final results of the LOPES radio interferometer for cosmic-ray air showers. *The European Physical Journal C*, 81(2). <https://doi.org/10.1140/epjcs/10052-021-08912-4>
- [7] Hörandel, J. R., on behalf of the LOFAR Key Science Project Cosmic Rays and the Pierre Auger Collaboration Radio. (2016). *Radio detection of air showers with LOFAR and AERA*. In *Proceedings of the International Symposium for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2014)*. JPS Conference Proceedings, 9, 010004. <https://doi.org/10.7566/JPSCP9.010004>
- [8] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Ahn, E. J., Al Samarai, I., Albuquerque, I. F. M., Allekotte, I., Allison, P., Almela, A., Alvarez Castillo, J., Alvarez-Muñiz, J., Alves Batista, R., Ambrosio, M., Aminaei, A., Anastasi, G. A., Anchordoqui, L., Andringa, S., Aramo, C., Arqueros, F., . . . Zuccarello, F. (2016). Nanosecond-level time synchronization of autonomous radio detector stations for extensive air showers. *Journal of Instrumentation*, 11(1). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/P01018>
- [9] Lautridou, P., & Codalema Collaboration. (2009). Results of the radio-detection experiment CODALEMA. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, 604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.164>
- [10] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I. F. M., Allekotte, I., Almela, A., Castillo, J. A., Alvarez-Muñiz, J., Anastasi, G. A., Anchordoqui, L., Andrada, B., Andringa, S., Aramo, C., Arqueros, F., Arsene, N., Asorey, H., Assis, P., Aublin, J., . . . Zuccarello, F. (2017). Calibration of the logarithmic-periodic dipole antenna (LPDA) radio stations at the Pierre Auger Observatory using an octocopter. *Journal of Instrumentation*, 12(10). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/T10005>
- [11] Pont, B. (2021). A large radio detector at the Pierre Auger Observatory: Measuring the properties of cosmic rays up to the highest energies. *Proceedings of Science*, 358. <https://doi.org/10.22323/1.358.0395>
- [12] Mantilla, C., Audelo, M., Calderon, M., Carrera, E., Cazar, D., Martinez, O., Quishpe, R., Vargas, S., & Vasquez, N. (2015). Implementing a WCD detector system in Ecuador as part of the LAGO Project. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 267–269, 430–432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.143>
- [13] Lind, F. D., Erickson, P. J., Coster, A. J., Foster, J. C., Marchese, J. R., Berkowitz, Z., & Sahr, J. D. (2013). Intercepted signals for ionospheric science. *Radio Science*, 48(3). <https://doi.org/10.1002/rds.20034>



- [14] Palán Murillo, J. D. (2024). *Guías de prácticas de laboratorio interdisciplinarias para sistemas de comunicaciones utilizando radio definida por software* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Digital UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/c5de48fc-43f0-47f3-bc31-2f79f547a37fcx>
- [15] Wray Castle. (2024). *Comprensión de la radio definida por software: una guía para principiantes*. Wray Castle Blog. <https://wraycastle.com/es/blogs/knowledge-base/software-defined-radio>
- [16] Per Vices. (2022). *Using SDRs for Signals Intelligence (SIGINT)*. <https://www.mpdigest.com/2022/08/22/using-sdrs-for-signals-intelligence-sigint/>
- [17] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.
- [18] Carrel, R. L. (1961). *The design of log-periodic dipole antennas*. In *IRE National Convention Record, Part I* (pp. 61–75). Institute of Radio Engineers. <https://doi.org/10.1109/IRECON.1961.1151016>
- [19] Stroobandt, S., & McCue, M. (2020). *Log-Periodic Dipole Calculator* (v20180914) [Sitio web]. Hamwaves. <https://hamwaves.com/lpda/>
- [20] ANSYS design software (student version). *Antenna design & modelling software* <https://www.ansys.com/applications/antenna-design-and-placement>
- [21] Gozal, N. R., & Mukhlis, Y. (2019). Design and manufactured of log-periodic dipole array antenna at 400 MHz. *Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science*, 2(2), 25–30. <https://doi.org/10.26905/jeemecs.v2i2.3126>
- [22] Abreu, P., Aglietta, M., Ahlers, M., Ahn, E. J., Albuquerque, I. F. M., Allard, D., Allekotte, I., Allen, J., Allison, P., Almela, A., Castillo, J. A., Alvarez-Muñiz, J., Batista, R. A., Ambrosio, M., Aminaei, A., Anchordoqui, L., Andringa, S., Antičić, T., Aramo, C., ... Seeger, O. (2012). Antennas for the detection of radio emission pulses from cosmic-ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation*, 7(10). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10011x>

Design, Analysis and Comparison of Hybrid and Non-Pneumatic Tyres

Shamsher Ali¹, Syed Aliyar Shah¹, Moiz Ahmad¹, Syed Muhammad Zain¹, Ahsan Rehman Khan¹

¹ National University of Science and Technology, NUST, Islamabad

*Corresponding author / Autor para correspondencia: shamsher.offic@gmail.com

Diseño, análisis y comparación de neumáticos híbridos y no neumáticos

Abstract

Non-Pneumatic Tires (NPTs), or airless tires, are load-bearing tires that do not require air pressure, for that purpose they employ flexible spokes made of thermoplastic Polyurethane. These NPTs are characterized by elastic spokes, durability, and resistance to wear, which makes them quite preferable for military, defense, industrial, and space vehicle applications. However, they are limited in their ability to absorb shocks and provide comfort, thus limiting their application in civilian vehicles. Hybrid tires provide a solution that unites the merits of NPTs and conventional pneumatic tires. They consist of flexible spokes together with pressurized air, thus giving them the properties of both. NPTs' durability and the comfort of a conventional tire. This study is highly focused and presents a comparison of NPTs and hybrid tires. A Finite Element Analysis (FEA) of both models indicates that with respect to strength and durability, hybrid tires fare very well for civilian vehicles, though their strength may be slightly less than that of NPTs.

Keywords: Structural Analysis, Non-Pneumatic Tires, Spokes, Finite Element Analysis, Hybrid Tire.

Resumen

Neumáticos no neumáticos, o neumáticos sin aire, son neumáticos portadores de carga que no requieren presión de aire; para ese propósito emplean radios flexibles de poliuretano termoplástico. Estos NPTs se caracterizan por sus radios elásticos, durabilidad y resistencia al desgaste, lo que los hace bastante preferibles en aplicaciones militares, de defensa, industriales y de vehículos espaciales. Sin embargo, presentan limitaciones en su capacidad de absorber impactos y proporcionar confort, lo que restringe su aplicación en vehículos civiles. Los neumáticos híbridos ofrecen una solución que combina los méritos de los NPTs y de los neumáticos neumáticos convencionales. Están compuestos por radios flexibles junto con aire presurizado, lo que les otorga propiedades de ambos lados: la durabilidad de los NPTs y la comodidad de un neumático convencional. Este estudio está altamente enfocado y presenta una comparación entre los NPTs y los neumáticos híbridos. El análisis por elementos finitos (FEA) de ambos modelos indica que, con respecto a la resistencia y durabilidad, los neumáticos híbridos funcionan muy bien para vehículos civiles, aunque su resistencia pueda ser ligeramente menor que la de los NPTs.

Palabras clave: Análisis estructural, neumáticos no neumáticos, radios, análisis por elementos finitos, neumático híbrido.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O. L. Lantsoght

Recibido /
Received:
11/06/2025

Aceptado /
Accepted:
26/09/2025

Publicado en línea /
Published online:
19/12/2025

INTRODUCTION

Tires are fundamental to transportation systems because they enable effective vehicle operation by rolling with drastically reduced friction and energy loss compared to sliding or other forms of locomotion. This efficiency improves fuel economy and safety by giving crucial traction, load carrying capacity and vibration dampening. The pneumatic tire, patented by John Boyd Dunlop in 1888 has set the standard for suspension system design due to its relative light weight and excellent shock absorption and low rolling resistance characteristics that promote ride comfort and energy efficiency [1]. However, pneumatic tires are prone to punctures, blowouts, and pressure loss under heavy or prolonged use, making them unreliable for critical applications such as military operations, space exploration, and industrial environments where durability and minimal downtime are important [2]. These limitations have spurred the development of alternative tire designs that prioritize reliability without sacrificing functionality.

Airless tires, also known as Non-Pneumatic Tires (NPTs), developed in the 1920s as a response to limitations of the pneumatic tires. NPTs eradicate dependence on air that encourage hazards such as puncture, bursting, wear, tear and pressure variability. Contemporary NPTs, like the Michelin Uptis, are common in industry, military and aerospace. Fig. 1 illustrates that NPTs consist of four primary components; a rigid aluminum alloy hub for structural integrity, flexible polyurethane spokes for load distribution and deformation absorption, a shear band for efficient force transfer and shape retention, and a durable tread made of styrene-butadiene rubber (SBR) for enhanced grip and wear resistance. Recent advancements, such as cellular structures in the shear band, have improved flexibility and energy damping [3, 4]. While NPTs excel in low-maintenance and high-durability applications, their high production costs, limited shock absorption, and reduced ride comfort make them less suitable for civilian vehicles [5].

To address these shortcomings, hybrid tires have been developed, combining the durability of NPTs with the comfort of pneumatic tires. Introduced by Kumho Tyre Co. in 2020, hybrid designs like the E-Tops, which received the International Design Excellence Award, integrate a pressurized air-filled core for enhanced shock absorption and ride quality with a non-pneumatic framework of polyurethane spokes, a flexible shear band, and a replaceable tread made from SBR or polybutadiene rubber. Fig. 2 shows the schematic structural diagram. Elastic membranes shield internal components retaining tire shape and performance, while a hub (or rim) of aluminum alloy provides structural support. By minimizing the amount of material needed for replacement and maximizing the life of the tire, the sustainability benefits offered by the replaceable tread is a step toward making hybrid tires a viable option for domestic transport and embracing their low-maintenance, environmentally-friendly potential [6].

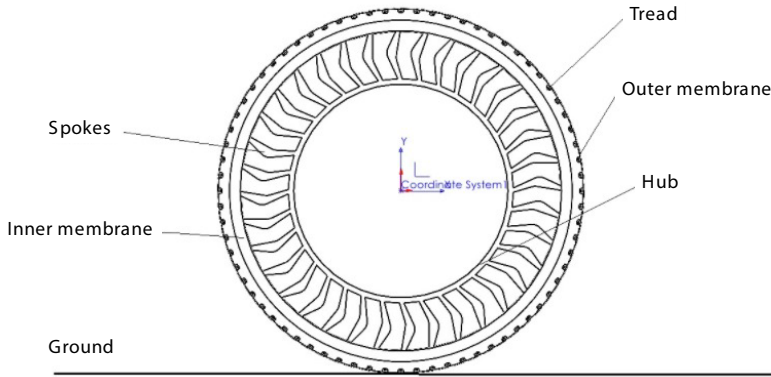


FIGURE 1. Schematic representation of a non-pneumatic Tire.

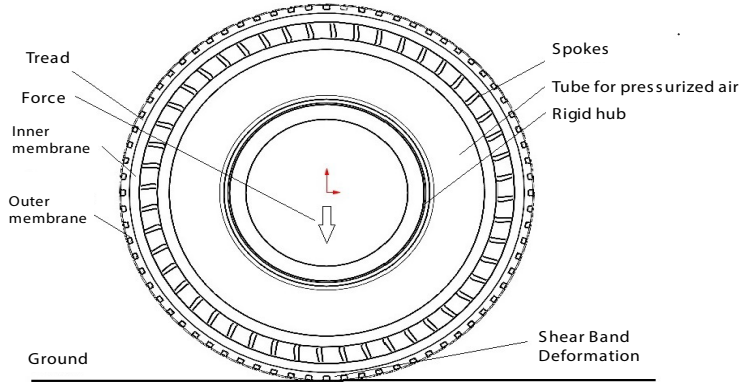


FIGURE 2. Schematic representation of Hybrid Tire

Although tire development has made major strides, gaps in research still exist. The design, mechanical properties and applications of NPTs have been investigated via a Finite Element Analysis (FEA) [2,3,7], however, limited research has been conducted on hybrid tires, particularly that focused on performance comparisons with NPTs under standardized loading conditions. While literature confirms the durability of NPTs, they suffer from major drawbacks including high heat production and excessive weight and/or low comfort for civilian vehicles with limited exploration of hybrid configurations to mitigate these issues [5,8]. Additionally, despite the various applications of FEA to tire modeling [9,10,11,12], a significant research gap is identified on comparative structural analysis of NPTs and hybrid tires, and their relative performance for civilian applications. This area is significant as there is an increasing focus on sustainability in the automotive industry as electric and hybrid vehicles have specific tire requirements in terms of performance and comfort.

Finite Element Analysis (FEA) has been widely used to study tire performance, providing insights into stress, strain, and deformation under various conditions. Previous studies



have explored FEA for both pneumatic and non-pneumatic tires. Relevant literature summarized in Table 1, [9] developed an FEA model to analyze the contact behavior of pneumatic tires, emphasizing the importance of accurate boundary conditions. Similarly, [10] investigated tire structural dynamics under static and dynamic loads, highlighting the role of material properties in simulation accuracy. Focused on optimizing non-pneumatic tire designs using FEA, demonstrating the impact of spoke geometry on load distribution. In a recent study FEA is conducted to evaluate tire-soil interactions, underscoring the need for realistic loading scenarios [11,12]. Current work conducts a comparative FEA of NPTs and hybrid tires, focusing on their structural performance under static conditions. By integrating insights from prior research, we aim to provide a comprehensive evaluation of these tire designs.

TABLE 1: Summary of Key Literature on Tire Modeling Using Finite Element Analysis

Study	Focus	Methodology	Key Findings	Relevance to Current Study
Cho et al. [9]	Pneumatic tire contact behavior	FEA with emphasis on boundary conditions	Accurate boundary conditions critical for predicting contact pressure and deformation	Provides foundation for defining realistic boundary conditions in NPT and hybrid tire FEA
Koronović et al. [10]	Tire structural dynamics	FEA under static and dynamic loads	Material properties significantly influence simulation accuracy	Informs material selection and load application for comparative FEA
Zhang et al. [12]	Non-pneumatic tire optimization	FEA with focus on spoke geometry	Spoke design impacts load distribution and tire performance	Guides spoke modeling in NPT and hybrid tire designs
Behroozinia et al. [11]	Tire-soil interaction	FEA with realistic loading scenarios	Realistic loads essential for accurate tire performance prediction	Supports use of standardized road conditions in current study
Mohan et al. [2]	Non-pneumatic tire design	FEA of polyurethane-based NPTs	Polyurethane spokes enhance durability but limit comfort	Basis for NPT modeling and comparison with hybrid tires
Ali et al. [3]	Non-pneumatic tire structural analysis	FEA of polyurethane spoke structures	Spoke geometry affects stress and strain distribution	Provides insights for NPT design and hybrid tire comparisons
Deng et al. [5]	Review of non-pneumatic tire research	Comprehensive review of NPT designs and challenges	NPTs face limitations in comfort and cost for civilian use	Highlights research gap in hybrid tire studies
Genovese et al. [8]	Non-pneumatic tire analysis	Experimental and numerical FEA	NPTs show robust durability but limited shock absorption	Underscores need for hybrid tire evaluations



The current study fills these gaps by generating consistent 3D FE models of a typical hybrid tire and an equivalent pure NPT and validating the model through published experiments. The significance of this study lies in its potential to advance sustainable transportation. Hybrid tires offer a balanced solution that reduces environmental impact through retreadable treads, lowers rolling resistance for improved fuel efficiency, and minimizes tire-related emissions, aligning with global efforts toward greener mobility. Through comparison FEA of NPTs and hybrid tires under normal static conditions, this work offers practical insights on the structural performance of the two types of tire, demonstrating hybrid tire superiority for civilian application and proposing new research directions in sustainable tire development. This research supports the automotive industry's move towards sustainable mobility by providing ecologically friendly, low-cost, high-performance tire solutions.

For simplicity and computational efficiency, the following assumptions were made; homogeneous isotropic linearly elastic materials were considered, thermal effects and geometric irregularities were neglected, and only static load conditions were analyzed, omitting dynamic factors like inertia and damping. These assumptions align with standard practices in preliminary tire FEA studies [9,12]. In current FEA model studies, the spokes and the shear band have been modeled with a linear-elastic polyurethane material, and the rim with aluminum (linear-elastic, high-stiffness). This is in accordance with the literature i.e. [8,13] presented the spokes and shear band of a Michelin Tweel as linear-elastic PU with $E = 62 \text{ Mpa}$ and $\nu = 0.48$. This simplification, they indicated, only causes a limited amount of error but saves a lot of computation time. This is done similarly in the present research, with a PU modulus and Poisson ratio. Future research studies helped perfect the destined research on adding dynamic loading and experimental validation in the study to counter the existing limitations. They observed that this simplification involves a limited portion of error but greatly reduces computation time. A similar approach is adopted in the current study, using a PU modulus and Poisson ratio. Further studies should study dynamic loading cases and experimentally validate them to counter the limitations of the current research.

MATERIALS AND METHODS

The Finite Element Analysis (FEA) in this study was conducted using Ansys Workbench following established methodologies for tire modeling [2,9,12]. CAD models (shown in Fig. 3) for both types were created using SolidWorks 2024, while market standard dimensions, which are used for nominal civilian vehicles, are considered for the CAD. The selection of key parameters, including material properties, boundary conditions, and meshing strategies, was guided by their prevalence in prior literature and their suitability for simulating realistic tire behavior. The properties of Polyurethane were chosen for the [2] as the primary material for spokes in both NPT and hybrid tire models due to its widespread use in NPT designs, offering a balance of flexibility and durability [2,3]. For the hybrid tire, the rim material was 6061 Aluminum Alloy, a which is common material in tire hubs for its high strength-to-weight ratio. The aluminum rim is orders of magnitude stiffer and deforms negligibly under the applied loads, so a linear-elastic model is appropriate (and its hub is kinematically constrained to mimic a rigid wheel), as in [8,10].

In current research FEA models, the spokes and shear band are assigned a linear-elastic polyurethane material, and the rim is modeled as aluminum (linear-elastic, high stiffness).



This follows consistency with literature [8,13] in which the spokes and shear band of NPT are modeled as linear-elastic PU with $E \approx 62$ MPa and $\nu = 0.48$. They noted that this simplification introduces only “a small range of error” while greatly reducing computation time. A similar approach is adopted in the current study, using a PU modulus and Poisson ratio. For simplicity and computational efficiency, the following assumptions were made: homogeneous isotropic linearly elastic materials were considered, thermal effects and geometric irregularities were neglected, and only static load conditions were analyzed, omitting dynamic factors like inertia and damping. These assumptions align with standard practices in preliminary tire FEA studies [9,12] but will be refined in future work to include dynamic loading and experimental validation to address current limitations. The material properties are shown in Table 2.

TABLE 2. Material Properties

Material	Material Model	Elastic Modulus E (MPa)	Poisson's Ratio
Polyurethane	Linear Elastic	62	0.48
6061 Aluminum Alloy	Linear Elastic	69×10^3	0.33

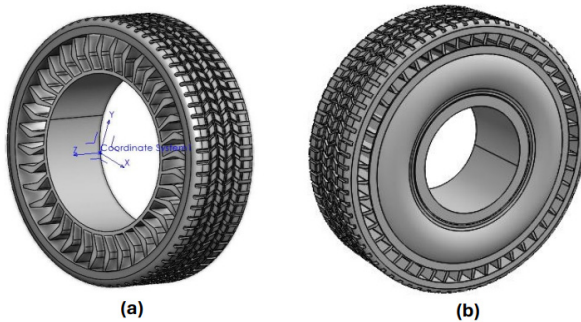


FIGURE 3. (a) CAD Model of Non-Pneumatic Tire. (b) CAD Model Hybrid Tire

Boundary conditions were selected to match realistic scenarios. The bearing load of 5000 N was applied to simulate the average load on a vehicle rim, aligning with realistic scenarios described in [9]. Gravity loads were included to account for weight distribution, and isotropic material assumptions were made to simplify the analysis, following standard practices in preliminary tire FEA studies [2]. These values align with experimental benchmarks [14] and [15] report results at 3–5 kN vertical loads, in line with our models. We thus chose 5000 N to cover a realistic passenger-vehicle wheel load (i.e. ~ 4 –5 kN per wheel for a 2000 kg car). The air pressure in the hybrid tire’s inner core ($172,369$ N/m² or 25 psi) was selected to represent typical passenger vehicle conditions, consistent with the standards outlined. These choices ensure that simulations are both computationally feasible and representative of real-world tire performance, providing a reliable basis for comparing NPTs and hybrid tires. Fixtures were applied to the plane below the tire and the bottom portion of the tire. The loading conditions were carefully selected to represent realistic scenarios for the system under study. Air Pressure Force: In the pneumatic part, the pressurized air is induced with a pressure of $172,369$ N/m² (25 psi), applied both inward on the rim and outward on the spoke region. A load of 5000 N



was applied vertically downward on the lower face of the rim, representing the average loading on a vehicle rim. Gravity effects were consistently applied across the model to simulate the weight distribution of the tire. The rim and the pneumatic part materials in the hybrid tire design were interacted together by adding an interaction feature which helps to explain the behavior of the tire according to the interactions between different materials used in the system i.e. 6061 Al Alloy, Air and Polyurethane.

Meshing was conducted in Ansys Workbench using tetrahedral elements, which offer 3 degrees of freedom. The FEA utilized Jacobian 16-point tetrahedral elements, ensuring meticulous meshing minimizing computational cost, as recommended by [12] for complex tire geometries. Mesh details are provided in Table 3 and 4. Mesh convergence studies ensured that results are mesh independent. Mesh is refined until peak von Mises stresses and displacements change by <3%, as is standard practice. In all cases, the load–deflection curves and stress patterns remained consistent. These verifications give confidence that our discretization and material assumptions are sound.

TABLE 3. Mesh Details (Hybrid Tire)

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Jacobian check for shell	Off
Maximum element size	2.11898 in
Minimum element size	0.105949 in
Mesh Quality	High
Total Nodes	293756
Total Elements	153560

TABLE 4: Mesh Details of NPT

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Maximum element size	1.48688 in
Minimum element size	0.0743438 in
Mesh Quality	High
Total Nodes	535555
Total Elements	330023
Maximum Aspect Ratio	23.107
% of elements with Aspect Ratio < 3	95.5
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.154
Percentage of distorted elements	0

Table 5 illustrates the geometry of NPT to polyurethane (PU). Following the previous research work on design and analysis of NPTs, the material applied on the spokes is Polyurethane [2]. For simplification and to reduce the computational cost, in the current case the total geometry of NPT is composed of PU only. Table 6 illustrates the material applied on the rim is 6061 Aluminum Alloy. And the material for the remaining bodies i.e. side walls of the pneumatic part, Spokes, and outer rubber is Polyurethane.

TABLE 5. Material Properties NPT

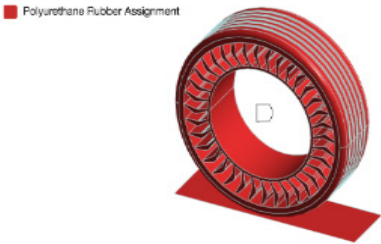
Model Reference	Properties
	<p>NPT properties Name: Polyurethane rubber Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Von Mises Stress Elastic modulus: 62 MPa Poisson's ratio: 0.48</p>

TABLE 6. Material properties of hybrid tire

	<p>Hybrid tire rim properties Name: 60610 Al - Alloy Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Von Mises Stress Elastic modulus: 69 GPa Poisson's ratio: 0.33</p>
	<p>Hybrid tire properties Name: Polyurethane rubber Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Von Mises Stress Elastic modulus: 62 MPa Poisson's ratio: 0.48</p>

For FEA, We follow established validation metrics (i.e. maximum Von Mises stress, maximum strain, deformation, and radial stiffness) as recommended in reviews [5,16]. Radial stiffness was calculated for each tire model by equation 1.

$$\text{Radial stiffness } (k) = \frac{F}{\delta} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

Where F is the load applied in N, and δ is the total deformation in mm.

For validation, results are compared with [8,14,15,17] and the hybrid ring model of [18]. By doing so, this study quantifies how the inclusion of an air core (in the hybrid) alters compliance, stress, and safety factors under static loading, thereby filling a key knowledge gap in tire design research.

RESULTS

The key aspects for the performance of a tire i.e. stress, strain and deformation are evaluated and analyzed for both models. In the hybrid, the maximum stress is produced at the spokes' edges (which are connected with the pneumatic part) and also at the pneumatic part edges which are connected to the rim. In the hybrid, the maximum stress produced 1.2008×10^7 N/m² (or Pa). In the NPT, the maximum stress produced at the spoke's edges is 0.16243×10^7 N/m² (or Pa). In both models the stress produced is significantly less than the yield point. The Von Mises stress results are shown on Fig. 4. The stress in the hybrid tire exceeds than that of NPT, which is due to the air pressure in the pneumatic part of the hybrid tire.

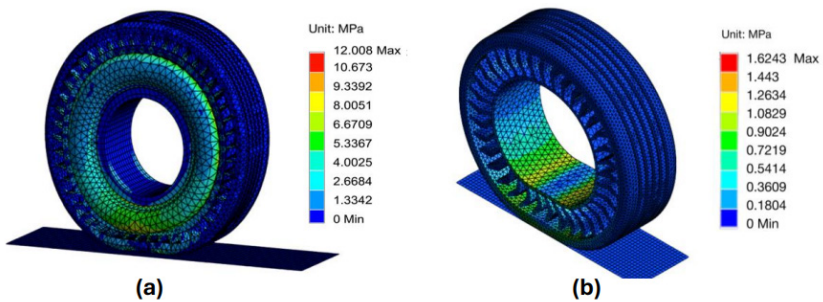


FIGURE 4. Von Mises stress in models (a) Hybrid tire (b) NPT

In the hybrid tire, the maximum strain is located at the walls of the pneumatic part and at the edges of the bottom spokes, which is 0.4816. The equivalent strain results are shown in Fig. 5. In the NPT model, the maximum strain has a value of 0.026314. which is observed at the bottom edges of the spokes (edges which relate to the tread surface). However, the strain in the hybrid model is higher than the strain in the NPT due to the pneumatic part.

Deformation analysis further emphasized the structural robustness of the hybrid model in comparison to the PT. In contrast to conventional designs, which show more high deformation under 5kN load, the hybrid experienced maximum deformation under applied loads and the value is greater than that of the NPT. This is because the NPT contains more spokes material due to which it is stiffer than the hybrid. That is why the deformation in the NPT will be less than the deformation in the hybrid tire for the same loading scenario. The maximum deformation contour plots are shown in Fig. 6. in which the maximum deformation for hybrid is 17.753 mm but for the NPT it is 14.947 mm.

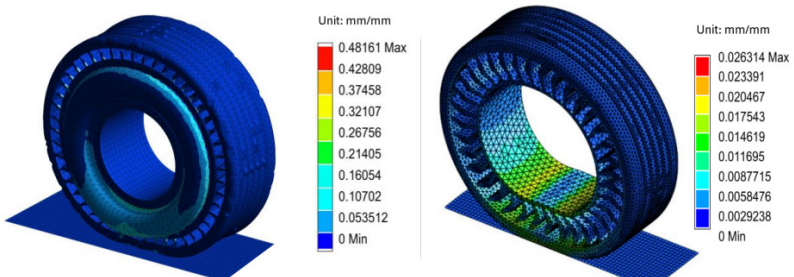


FIGURE 5. Equivalent strain in models (a) Hybrid tyre (b) NPT

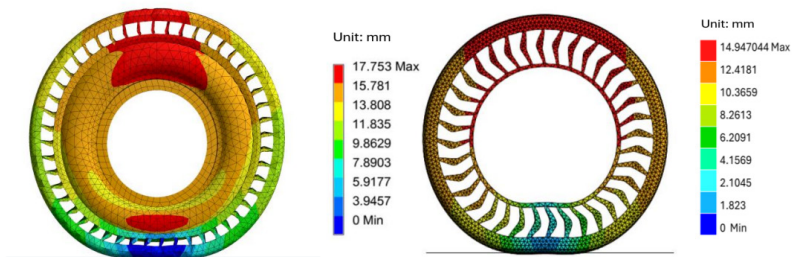


FIGURE 6. Total deformation in models (a) Hybrid tyre (b) NPT

DISCUSSION

Simulations provide valuable insights by modeling complex behaviors efficiently, but they rely on assumptions (e.g., homogeneous isotropic materials, neglect of thermal effects, static loads only) that may not capture nonlinearities, material variabilities, or dynamic interactions fully. To bridge this gap, benchmarking (comparing) simulation outputs to data from other studies with experimental validation is a practical approach. This method is common in tire engineering literature, where FEA outputs are tuned and verified against physical tests and relevant literature. This demonstrates that our model aligns with established benchmarks, building confidence in the results.

We selected six metrics directly related to our FEA results, and commonly reported in the literature: radial stiffness (N/mm), deflection (displacement at a specified kN load),



stress (MPa), and strain, summarized in Table 7. Such a decision is consistent with the practice in the field and the recommendations on the testing and reporting of the NPT [5]. Findings were validated against experimental data sets published in studies by [8,14,15,19]. Moreover, we also considered a spoke-architecture validation precedence [20]. The literature provided the lateral and multi-axis stiffness to conceptualize the limits of the static, vertical load FEA [21].

Stress and Strain Comparison: Maximum stress and strain in both models, can be benchmarked against [8], who validated an FEA model of the Michelin X-Tweel NPT against experiments. The study reported good agreement in stress distribution with experimental results for the NPT. This suggests stress values are plausible, as they fall within ranges for polyurethane-based spokes under similar loads.

Deformation: Deformations align within the range estimated from the graphs (radial stiffness versus load) for NPTs generated by [22] in their paper. Validation for our NPT model was made with the NPT_1 of [22], while for the validation of deformation produced in the hybrid tire, an estimate of the deformation range between the deformation of NPT_1 and (Pneumatic tire) PT_1 was taken as a benchmark because the hybrid tire contains both characteristics of the PT and the NPT. Experimental results from only NPT_1 and PT_1 have been considered because their dimensions align with the dimension of current models.

Radial Stiffness: [22] experimentally measured higher radial stiffness in NPTs vs. pneumatic tires, with hysteresis and shorter contact patches, providing a baseline for the validation of the radial stiffness of the current simulations. Our quasi-manometrically determined stiffness in NPTs are compared with the estimation taken from the graphs generated by [22]. We drop into phase also with the experimental-plus-numerical study of [8] for non-pneumatic architectures, in which we can make a like-for-like comparison of vertical compliance. [15] gives tests and FE with static load under a longitudinal pure slip that enables us to compare the displacement at kN loads to assure that our load-deflection slope lies within bands of the report.

The resulting displacement in the area where the applied forces are located is compared with force-deflection curves in [14]. The fact that there is agreement in slope and magnitude of the displacements under similar loads shows that the material stiffness and boundary assumptions belong to the reasonable range of the static conditions. And any very tiny deviations go into differences in the tread material mix, spoke topology or bonded interface idealizations and standard modelling idealizations reflected in an experimental / numerical cross-study [8,19].



TABLE 7. Validation of Max Stress, Equivalent Strains, Deformation and Radial Stiffness of our designs across literature

Metric	Hybrid Tire	NPT	Benchmark Study (Validation)	Agreement Notes
Max von Mises Stress (Pa)	1.2008×10^7	0.16243×10^7	$10^7 - 10^8$ [8]	Qualitative match; errors ~6–10% in similar FEA-experiment comparisons.
Equivalent Strain	0.4816	0.026314	[15]	Good alignment; FEA accuracy <5% for secant values.
Deformation (mm)	17.753	14.947	[22]	Consistent trends; experimental hysteresis higher in NPTs.
Radial Stiffness (N/mm)	281.642	334.515	Radial stiffness versus load graphs generated by [22]	Suggests hybrid may soften stiffness for comfort; validation errors <10%.

Through comparative analysis, the hybrid tire emerges as a superior choice over the NPT and the PT for civilian vehicles because its strength, durability and radial stiffness is well comparable to that of the NPT and it overcomes NPTs' inherent limitations while maintaining traditional pneumatic design benefits. The integration of pneumatic components dramatically boosts shock absorption and traction while decreasing weight to deliver enhanced ride comfort without sacrificing durability. Through the implementation of mixed mesh designs, tires achieve uniform stress distribution which enhances performance across different load conditions. The incorporation of sophisticated materials such as polyurethane and rubber alloys enhances the structural durability of hybrid tires, establishing them as a strong and durable alternative to both conventional pneumatic and non-pneumatic tire features.

While NPTs are good at resisting punctures, they can wear out over time, especially in tough conditions, and they are not suitable for the civilian vehicles due low shock absorption ability and poor traction . On the other hand, hybrid tires perform well in traction, handling, braking, and stability, whether you're on city streets or rough trails, because the hybrid contains a combination of the features from the NPT and the pneumatic tire (PT). In comparison to the PTs, hybrid tires stand out mainly because they last longer, with air-filled chambers and strong spokes, they're less likely to get damaged and tend to outlast regular pneumatic tires.

NPTs are more costly than the PTs, because NPTs require polyurethane spokes materials which are very costly, while the PTs just contain a vacant core for the air filling and the side walls material of the cores is a composite of styrene butadiene (SBR) materials, which are well known materials for tire manufacturing. The costs of the SBR composites are low relative to the PU material. The hybrid tire is evolving as a middle solution between the NPT and the PT in terms of costs. It makes a good argument for being a wise investment.



The costs would be more than that of traditional PT tires but significantly less than that of the NPTs. Although the hybrid tire also contains PU spokes materials, the size of the spokes is reduced as per the design to integrate the pneumatic feature in it. According to the Kumho Co design [23], the pneumatic core of the hybrid tire covers more than 50% of the tire diameter while the outer region, which consists of the PU spokes, covers less than 50% of the diameter. Thus in general hybrid tires would cost less than NPTs, but in the context of manufacturing costs, the hybrid's costs might become equal to NPTs.

Limitations and Future Work

Prior work has shown that cornering stiffness and combined loads can significantly affect tire response [24], so our static-only results are valid within the limit of vertical compliance. In practice, behaviors like skid, slip, and shock absorption involve friction, viscoelasticity, and rate effects that our model omits. To address these gaps, future work should extend both testing and modeling. On the experimental side, physical tests under more conditions are needed. We recommend: (i) high-resolution radial compression tests (quasi-static with fine displacement control) to capture full load–deflection curves; (ii) drop/shock tests to quantify energy absorption and rebound behavior; (iii) cyclic fatigue tests to measure durability limits under repeated loading; and (iv) footprint pressure mapping on both rigid and deformable (e.g. soil) surfaces. [8] and [14] suggest that such metrics especially focus on patch shapes and pressure distributions which are important for assessing ride comfort and grip.

The current model is linear-elastic and frictionless but not considered damping at the interface of the bonds; fatigue, thermal and dynamic effects, and end-lateral / combined loads conditions are not included. Contacts are treated frictionlessly, and no thermal or fatigue phenomena are considered. Crucially, only static, vertical loading is simulated – multi-axis conditions (lateral forces, braking/turning) and dynamics (inertia, vibration) are not captured. Incorporating nonlinear hyper-elastic or viscoelastic material models for the PU (as used in more detailed Tweel studies) would improve accuracy for large deformations. Frictional contact between tread and ground, and damping at the bonded interfaces should be included for dynamic simulations. Multi-axis load cases (lateral shear, camber, combined loads) would allow prediction of cornering stiffness and steering response; [24] find honeycomb NPTs exhibit very high cornering stiffness, an effect absent in static analyses. Finally, modeling deformable terrain (sand, mud) would generalize our results beyond rigid roads, as suggested by recent terrain-contact studies. Such extensions would build on the present work by capturing fatigue, thermal effects, and complex loading – ultimately enabling simulation-backed design of hybrid/NPT tires that are not only safe and comfortable, but also durable and versatile.

CONCLUSIONS

A finite element analysis performed on hybrid and non-pneumatic tires (NPTs) suggested that NPTs are greater in strength structurally, whereas the costs are extremely high. On the other hand, hybrid tires, while great on absorption of shocks, are durable and versatile in different kinds of driving conditions. They also reduce the risk of puncturing, use less material, and are more environmentally friendly because they can be retreaded.



In summary, hybrid tires balance performance, safety, and cost-effectiveness, making them an attractive option for sustainable innovations in the automotive industry. For the civilian vehicle, hybrid tires present a significant advancement in tire technology by combining the strengths of pneumatic and non-pneumatic designs.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Shamsher and Aliyar performed the whole technical analysis and CAD modelling and analysis; they also wrote the methodology section. Moiz and Ahsan wrote the introduction and literature review sections, Shamsher reviewed and modified their work. Zain and Ahsan worked on the comparative analysis of both tires, generated the graphs, tables and charts, and they also worked on the references.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

No data was used in this study.

CONFLICT OF INTEREST

Authors declare that they don't have any conflicts of interest in this research.

DECLARATION OF GENERATIVE AND AI-ASSISTED TECHNOLOGIES IN THE WRITING PROCESS

For this work, the authors used ChatGPT to format the data and comparison in tabular form. Afterwards, the authors reviewed and edited the content as deemed necessary and take full responsibility for the final version and the published content.

REFERENCES

- [1] Dunlop, J. B. (1888). Pneumatic tire. UK Patent No. 10,607.
- [2] Mohan, A., Johny, C. A., Tamilarasu, A., Bhasker, J. P., & Ravi, K. (2017). Design and analysis of non-pneumatic tyre. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, 062061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/6/062061>
- [3] Ali, M., Maarij, M., & Hussain, A. (2022). Design and structural analysis of non-pneumatic tyres for different structures of polyurethane spokes. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00093-5>
- [4] Mazur, V. (2018). Experimental research in automobile non-pneumatic tire force heterogeneity. *MATEC Web of Conferences*, 224, 02019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402019>
- [5] Deng, Y., Wang, Z., Shen, H., Gong, J., & Xiao, Z. (2023). A comprehensive review on non-pneumatic tyre research. *Materials & Design*, 227, 111742. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111742>
- [6] iF Design. (n.d.). E-Tops hybrid tire. *iF Design Award*. Retrieved September 19, 2024, from <https://ifdesign.com/en/winner-ranking/project/e-tops-hybrid-tire/308635>
- [7] Sardinha, M., Vaz, M. F., Ramos, T. R., & Reis, L. (2023). Design, properties, and applications of non-pneumatic tires: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 237(11), 2277–2297. <https://doi.org/10.1177/14644207231177302>
- [8] Genovese, A., Garofano, D., Sakhnevych, A., Timpone, F., & Farroni, F. (2021). Static and dynamic analysis of non-pneumatic tires based on experimental and numerical methods. *Applied Sciences*, 11(23), 11232. <https://doi.org/10.3390/app112311232>
- [9] Cho, J. R., Lee, H. W., Jeong, W. B., Jeong, K. M., & Kim, K. W. (2007). Finite element analysis of contact pressure and deformation of a pneumatic tire. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(12–13), 1247–1262. <https://doi.org/10.1080/15502280701471566>
- [10] Korunovic N, Trajanovic M, Stojkovic M (2007) Fea of tyres subjected to static loading. *J Serb Soc Comput Mech* 1:87–98
- [11] Behroozinia, P., Taheri, S., & Sandu, C. (2018). Tire carcass effect on tire–terrain interaction using finite element analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 911–925. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1475664>
- [12] Zhang, X., Liu, C., Liu, G., & Zhao, J. (2011). Optimization design of non-pneumatic tire structure based on finite element method. *Materials & Design*, 32(10), 4982–4989. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.055>
- [13] Rugsaj, R., & Suvanjumrat, C. (2018). Determination of material property for Non-Pneumatic tire spokes by inverse method. *Key Engineering Materials*, 777, 411–415. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.777.411>
- [14] Jackowski, J., Żmuda, M., Wiczorek, M., & Zuska, A. (2021). Quasi-static research of ATV/UTV non-pneumatic tires. *Energies*, 14(20), 6557. <https://doi.org/10.3390/en14206557>
- [15] Zhu, L., Xu, T., Liu, X., Wu, M., Zhou, X., & Gao, F. (2023). Test and simulation study on the static load and pure longitudinal slip characteristics of a non-pneumatic tire. *Machines*, 11(1), 86. <https://doi.org/10.3390/machines11010086>
- [16] Żmuda, M., & Jackowski, J. (2025). The review of selected Non-Pneumatic tires Properties—Load Carrying Mechanism, Structure of Non-Pneumatic Tires. *Materials*, 18(7), 1566. <https://doi.org/10.3390/ma18071566>
- [17] Zhao, Y., Du, X., Lin, F., Wang, Q., & Fu, H. (2018). Static stiffness characteristics of a new non-pneumatic tire with different hinge structure and distribution. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(7), 3057–3064. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0608-8>
- [18] Romano, L., Sakhnevych, A., Strano, S., & Timpone, F. (2020). A hybrid tyre model for in-plane dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 58(7), 1123–1145. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1608365>
- [19] Liu, W., Peeke, L. M., Periyasamy, M., Campbell, R. R., & Hickner, M. A. (2023a). Additive manufacturing of silicone composite structures with continuous carbon fiber reinforcement. *Polymer Engineering and Science*, 63(6), 1716–1724. <https://doi.org/10.1002/pen.26318>
- [20] Phromjan, J., & Suvanjumrat, C. (2022). Effects on spoke structure of non-pneumatic tires by finite element analysis. *International Journal of Automotive Technology*, 23(5), 1437–1450. <https://doi.org/10.1007/s12239-022-0126-7>



- [21] Zheng, Z., Rakheja, S., & Sedaghati, R. (2021). Multi-axis stiffness and road contact characteristics of honeycomb wheels: A parametric analysis using Taguchi method. *Composite Structures*, 279, 114735. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114735>
- [22] Jackowski J, Żmuda M, Wieczorek M, Comparative analysis of small size non-pneumatic tires and pneumatic tires - radial stiffness and hysteresis, selected parameters of the contact patch. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2023; 25(3) <http://doi.org/10.17531/ein/167362>
- [23] Kumho secures design award. (n.d.). Tire Technology International. Retrieved from <https://www.tiretechnologyinternational.com/news/awards/kumho-secures-design-award.html>
- [24] Zheng, Z., et al. (2022). Cornering stiffness characteristics of honeycomb wheels: Parametric analysis and response surface methodology. *Composite Structures*, 288, 115418. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115418>

Solución consensuada del mecanismo focal del sismo de M_W 8.8 en Kamchatka y campos de deformación cosísmica resultantes

Amilcar Carrera-Cevallos^{1*} 

¹ Autor independiente, Ecuador.

*Autor para correspondencia / Corresponding author: amilk1204@hotmail.com

Consensus solution of the focal mechanism of the M_W 8.8 earthquake in Kamchatka and the resulting seismic deformation fields

Resumen

El terremoto de magnitud M_W 8.8 de Kamchatka del 29 de julio de 2025 representa uno de los mayores eventos sísmicos registrados en la zona de subducción de Kuril-Kamchatka. Esta investigación sintetiza y compara las soluciones de mecanismo focal reportadas por agencias sismológicas internacionales, con el fin de obtener una solución consensuada representativa y modelar los campos de deformación cosísmica generados por la ruptura. Se aplicó como métrica de similitud la diferencia cuadrática media angular entre los parámetros de rumbo, buzamiento y deslizamiento, lo que permitió evaluar cuantitativamente la convergencia entre mecanismos. La solución consensuada (rumbo = 203.5°, buzamiento = 22.7°, deslizamiento = 70.1°) es coherente con un evento de tipo megafalla en la interfaz de subducción. A partir del modelo de ruptura finita del USGS, se calcularon los campos de desplazamiento y deformación mediante la formulación de dislocación elástica de Okada (1985). Los resultados muestran desplazamientos horizontales hacia la fosa, subsidencia al noroeste y levantamiento al suroeste del epicentro, con patrones de deformación que se correlacionan con la distribución de réplicas. La baja dispersión angular (rotación máxima = 28.4°) confirma la coherencia entre agencias. Este estudio contribuye a una caracterización más precisa del proceso de ruptura y a la mejora de los modelos regionales de peligro sísmico.

Palabras clave: Deformación cosísmica, Kamchatka, mecanismo focal, terremoto de megathrust.

Abstract

The M_W 8.8 Kamchatka earthquake of July 29, 2025, represents one of the largest seismic events recorded in the Kuril-Kamchatka subduction zone. This study synthesizes and compares the focal mechanism solutions reported by major seismological agencies to derive a representative consensus double-couple solution and to model the coseismic deformation fields generated by the rupture. The angular quadratic mean difference among strike, dip, and rake parameters was used as the main metric of similarity between mechanisms. The consensus solution (strike = 203.5°, dip = 22.7°, rake =



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received: 01/9/2025

Aceptado /
Accepted:
26/10/2025

Publicado en línea /
Published online:
05/03/2026



70.1°) is consistent with megathrust faulting on the subduction interface. Based on the USGS finite rupture model, surface displacement and strain fields were computed using Okada's (1985) elastic dislocation formulation. The results reveal horizontal displacements toward the trench, vertical subsidence to the northwest, and uplift to the southwest of the epicenter, with strain patterns correlating with aftershock distribution. The low angular dispersion (maximum rotation = 28.4°) confirms convergence among agency solutions. These findings contribute to a more reliable representation of rupture parameters and support regional seismic hazard modeling.

Keywords: Co-seismic deformation, focal mechanism, Kamchatka, megathrust earthquake.

INTRODUCCIÓN

La península de Kamchatka, una de las regiones sísmicas más activas del mundo [1], fue sacudida por un terremoto de M_W 8.8 a 35 km de profundidad el 29 de julio de 2025 [2]. Este evento, se dio en la ruptura de una gran área en la fosa de Kuril, Kamchatka, siendo este uno de los límites de placas de convergencia más rápidos del planeta [3], el cual fue precedido por una intensa secuencia premonitoria que incluyó el terremoto de M_W 7.4 el 20 de julio 2025 [4] y otro de M_W 7.1 en 2024 [5]. Este último se originó cerca de la sección infame de la megafalla (*megathrust*) que generó el terremoto de M_W 9.0 de 1952 en Severo-Kurilsk [6, 7].

La secuencia sísmica ocurrió en el Arco Kuril-Kamchatka [8], donde la placa del Pacífico se subduce hacia el noroeste, en dirección a la placa Norteamericana, a una velocidad de aproximadamente 8 cm/año [9]. Esta rápida convergencia genera una intensa deformación, lo que produce frecuentes terremotos corticales y numerosos sismos interplaca de interfaz de subducción, desde la fosa hasta los 60 km de profundidad [10, 11].

El terremoto de M_W 8.8 no solo es el más fuerte registrado a nivel global desde el evento en Tohoku, Japón de 2011 [12, 13], sino que también se encuentra entre los diez terremotos más fuertes registrados desde 1900 [14] y se destaca como el séptimo más largo por momento sísmico desde ese año [14]. El evento culminó en una serie de más de 50 réplicas de $\geq M_W$ 5.0 que comenzaron 10 días antes, incluidos tres sismos de M_W 6.6 y el ya mencionado evento de M_W 7.4 (Figura 1).

Este segmento de la zona de subducción presenta un historial de grandes rupturas sísmicas. En 1923, un terremoto de M_W 8.4, ocurrió aproximadamente 150 km al norte del epicentro de 2025. El evento más significativo fue el terremoto de M_W 9.0 de 1952 [7], cuyo epicentro se localizó a menos de 30 km del evento de 2025 y que provocó la ruptura hacia el suroeste de una sección de 600 km de longitud de interfaz de subducción [6].

Considerando una tasa de convergencia de 8 cm /año, la región había acumulado aproximadamente 6 metros de movimiento de placas desde el último megaterremoto [15]. Esto explica, tanto la elevada magnitud del evento ($\geq M_W$ 8.5) como el extenso proceso de ruptura, que pudo prolongarse durante varios minutos con eventos de larga duración, y los decenas de metros de deslizamiento cosísmico esperables en un evento de esta magnitud.

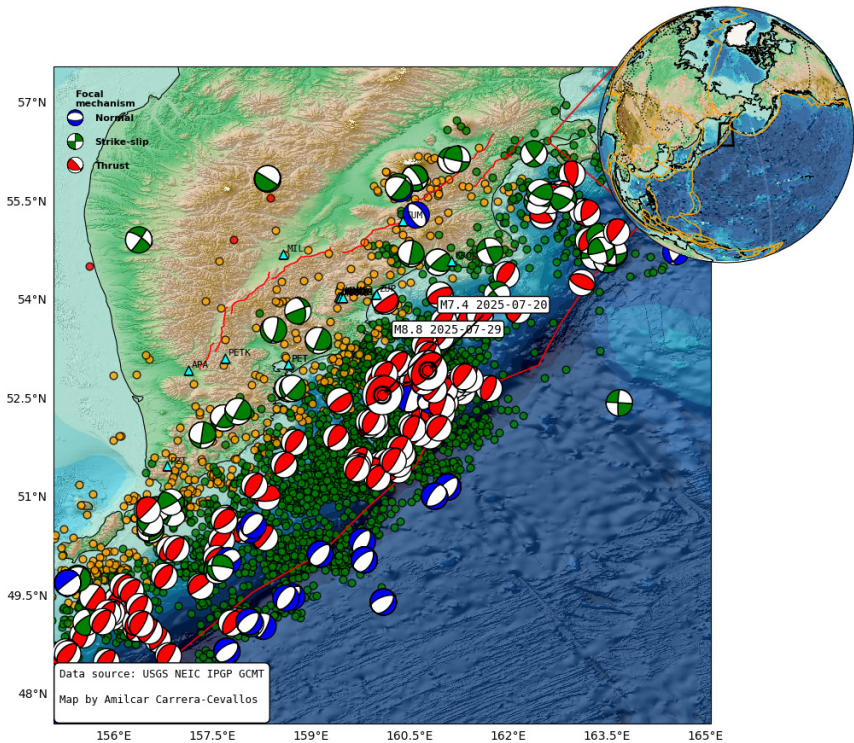


FIGURA 1. Mapa sismo tectónico del terremoto en Kamchatka de M_W 8.8 y su premonitorio de M_W 7.4. Las líneas rojas corresponden a las fallas activas de Styron et al. [16]. Los mecanismos focales pertenecen al GCMT. El mapa base pertenece GEBCO 2020.

Este evento dio origen a un tsunami transoceánico [17], un fenómeno característico de los grandes terremotos en zonas de subducción, donde esta amenaza representa el mayor riesgo asociado, tal como ocurrió con el devastador tsunami provocado por el terremoto de M_W 9.0 de 1952 en la misma región [7]. El mecanismo de generación consiste en el deslizamiento cosísmico de megaempuje (*megathrust*), que deforma el fondo marino creando una elevación que desplaza la columna de agua suprayacente. Estas ondas se propagan radialmente en todas las direcciones impulsadas por la gravedad. La Figura 2 muestra un modelo para los tiempos de arribo del tsunami para un terremoto genérico frente a las costas de Kamchatka proporcionado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [18].

Tras el terremoto, diversas instituciones calcularon soluciones de mecanismo focal que presentaron una dispersión significativa. Esta variabilidad dificulta la selección de un modelo único para aplicaciones como el análisis de la dinámica de ruptura, la transferencia de esfuerzos corticales o los estudios de precursores sísmicos. Dicha dispersión obedece principalmente a las diferencias metodológicas y a los conjuntos de datos utilizados por cada centro de investigación.



parámetros de rumbo y buzamiento reportados por cada institución. El procedimiento consistió en calcular, para cada combinación posible, el promedio cuadrático de las diferencias angulares individuales, seleccionando como solución final aquella que minimizó el valor total de $(\Delta\theta_{rms})$. Esta métrica permitió evaluar la dispersión relativa de las soluciones institucionales y establecer una representación estadísticamente robusta del mecanismo focal del evento.

Modelado de los campos de deformación cosísmica

Para cuantificar la deformación cortical generada por el sismo, se calcularon los campos de desplazamiento y deformación de la superficie. Los cálculos se realizaron utilizando el modelo de dislocación en un medio semi-infinito elástico, homogéneo e isótropo [20]. Como entrada para el modelo, se utilizó el modelo de ruptura finita del evento M_w 8.8 proporcionado por el USGS [2]. Se asumieron parámetros elásticos estándar para la corteza: un módulo de rigidez (μ) de 30 GPa y una razón de Poisson (ν) de 0.25. A partir del campo de desplazamiento resultante, se derivaron los componentes del tensor de deformación (deformación volumétrica, norte, este, noreste y cortante máximo) con el fin de analizar el patrón de deformación estática inducida por el evento.

Los cálculos de desplazamiento y deformación cosísmica se realizaron mediante rutinas propias de Python 3.11, empleando las bibliotecas *Pandas*, *Numpy* y *Matplotlib*. El archivo de entrada *surface_deformation_disp*, obtenido a partir del modelo de ruptura finita del USGS, contiene para punto geográfico los valores de longitud, latitud, elevación y los componentes de deslizamiento (U_x , U_y , U_z).

Los campos de desplazamiento horizontal y vertical fueron visualizados mediante mapas de contorno (*tricontourf*) y vectores de dirección de movimiento (*quiver*). A partir de los componentes U_x , U_y y U_z se calcularon deformaciones simples: deformación volumétrica ($U_x + U_y + U_z$), deformación hacia el norte (U_y), hacia el este (U_x) y en dirección noreste ($(U_x + U_y) / \sqrt{2}$).

Adicionalmente, se estimaron los campos de presión principal horizontal y demanda de deformación mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma_{principal} = (|U_x|, |U_y|), \sigma_{horizontal} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$$

RESULTADOS

Solución central del mecanismo focal

Se recopilaron seis soluciones de mecanismo focal reportadas por las agencias NEIC, GCMT, GFZ, IPGP, Instituto de Geofísica CEA y el Centro de Redes Sísmicas de China (Tabla 1). Cada solución fue descompuesta en sus parámetros angulares (rumbo, buzamiento y deslizamiento) y comparada mediante la diferencia cuadrática media angular $(\Delta\theta_{rms})$, definida como:



$$\Delta\theta_{rms} = \sqrt{\frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N [(\Delta strike)^2 + (\Delta dip)^2 + (\Delta rake)^2]}$$

Donde N representa el número de mecanismos analizados.

El proceso de análisis se realizó en MATLAB, y los resultados del mecanismo focal central se representan en la Figura 3. La solución inicial con la menor desviación estándar correspondió al mecanismo reportado por NEIC, que fue utilizado como punto de partida para la síntesis final.

Este estudio utilizó como resultado final los siguientes parámetros: (rumbo del plano nodal I 203.48°, buzamiento 22.70°, ángulo de deslizamiento 70.09°; rumbo del plano nodal II 44.91°, buzamiento 68.73°, ángulo de deslizamiento 98.11°). Como resultado final, se obtuvieron los siguientes resultados: con un rumbo del eje P de 128.68° y una inclinación de 23,31°. Adicionalmente, los rangos de incertidumbre son 113.07–144.07° y 8.34–38.21°, respectivamente. El eje B se inclina 221,95° y se inclina 7,55°, con incertidumbres que oscilan entre 206.34–237.34° y 2.14–13.36°, respectivamente.

El eje T se inclina 328.74° y se inclina 65.35°, con incertidumbres que oscilan entre 301.88–363.59° y 55.54–79.10°, respectivamente. Como se puede observar en la Tabla 1 y la Figura 3, la solución del mecanismo focal para este terremoto tiene un ángulo máximo de rotación espacial de 28.40° con respecto a la solución central y un ángulo mínimo de rotación espacial de 6.44°. Estos datos indican que las soluciones del mecanismo focal obtenidas por diferentes instituciones y autores son relativamente convergentes.

TABLA 1. Soluciones del mecanismo focal del terremoto de Kamchatka con M_w 8.8 proporcionadas por diferentes instituciones y la desviación estándar de las soluciones del mecanismo focal central obtenidas.

N°	Mecanismo focal en la solución inicial	Mecanismo focal determinado como epicentro inicial	Institución	Desviación estándar de la solución inicial (s)	Ángulo máximo de rotación espacial del mecanismo focal respecto a NEIC (°)
1	199; 28; 56	203.32; 22.72; 69.94	Centro de Redes Sísmicas de China	16.306093	11.51
2	210; 18; 80	203.31; 22.71; 69.93	Instituto de Geofísica, CEA (Zhang Chi)	16.306118	19.12
3	232; 19; 116	203.40; 22.70; 70.01	IPGP	16.306018	21.92
4	209; 13; 73	203.49; 22.68; 70.10	GFZ	16.306115	10.98
5	214; 19; 87	203.49; 22.68; 70.11	GCMT	16.306144	8.40
6	198; 18; 51	203.48; 22.70; 70.09	NEIC	16.306144	—

Nota: GCMT, tensor de momento sísmico global; IPGP, Institut de Physique du Globe de Paris; GFZ, German Research Centre for Solid Earth Sciences.

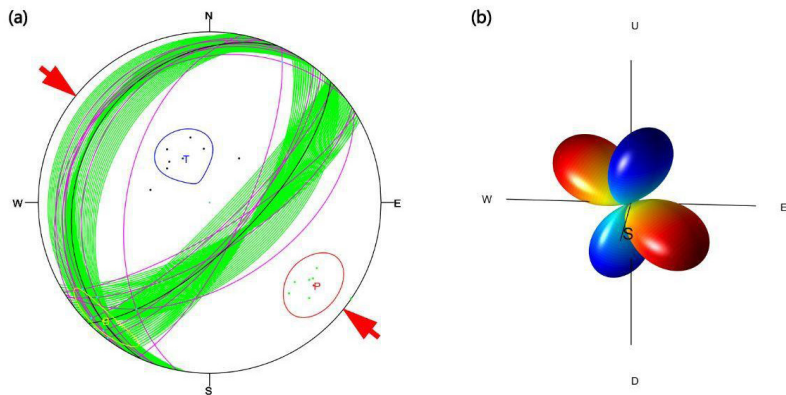


FIGURA 3. Solución del mecanismo focal central (a) y patrón de radiación tridimensional espacial (b) del terremoto de M_w 8.8 de Kamchatka.

Nota: Los arcos negros en (a) representan los dos planos nodales del mecanismo focal central, mientras que el área cubierta por el arco verde representa su rango de incertidumbre. Los puntos rojos, azules y amarillos representan el eje P, el eje T y el eje B de la solución del mecanismo focal central, y las curvas cerradas de colores correspondientes alrededor de ellos representan sus rangos de incertidumbre. Los puntos verdes y negros representan las proyecciones del eje P y el eje T del mecanismo focal obtenidos por varias instituciones. Los arcos morados representan los planos nodales del mecanismo focal obtenidos por varias instituciones y el autor. La región de compresión y la región de expansión en (b) están representadas en azul y rojo, respectivamente.

Campos de desplazamiento y deformación cosísmica

Para entender el impacto del terremoto de M_w 8.8 de Kamchatka en el área circundante, se hizo el cálculo del campo de desplazamiento cosísmico de la superficie, la deformación superficial, la deformación volumétrica, la deformación norte, la deformación ESTE y la deformación NORESTE generadas por el terremoto en el área circundante con base en el modelo de ruptura del terremoto de M_w 8.8 de Kamchatka proporcionado por el sitio web del USGS [2] (Figuras 4, 5, 6).

El procesamiento del archivo `surface_deformation.disp` permitió obtener el campo cosísmico de desplazamientos tridimensionales (U_x , U_y , U_z) y las deformaciones derivadas. Los cálculos se realizaron en Python 3.11, empleando rutinas de análisis matricial y visualización geoespacial desarrolladas específicamente para este estudio.

Los resultados indican:

- Desplazamiento horizontal máximo: aproximadamente 1.2 m dirigido hacia el sur-suroeste, coherente con el acortamiento interplaca.
- Desplazamiento vertical: levantamiento máximo de 0.9 m al suroeste del epicentro y subsidencia de hasta -0.7 m al noroeste.
- Deformación volumétrica: extensión dominante en el sector noreste ($\epsilon_{vol} \approx +1.6 \times 10^{-9}$) y compresión al suroeste ($\epsilon_{vol} \approx -1.9 \times 10^{-9}$).
- Deformación horizontal máxima: 2.3×10^{-9} en dirección noreste.

Como se puede observar en la Figura 4, el campo de desplazamiento cerca del sismo presenta las siguientes características preliminares: desde la perspectiva del campo de desplazamiento horizontal en la superficie, el material en la sección suroeste de la zona de ruptura de la fuente fluye hacia el sur, y el material en los lados noroeste y suroeste fluye hacia la zona de ruptura de la fuente; el campo de desplazamiento vertical muestra elevación en el lado suroeste del epicentro, mientras que muestra subsidencia en los lados oeste y norte. Este sismo cumple con las características del campo de desplazamiento generado por un sismo de empuje.

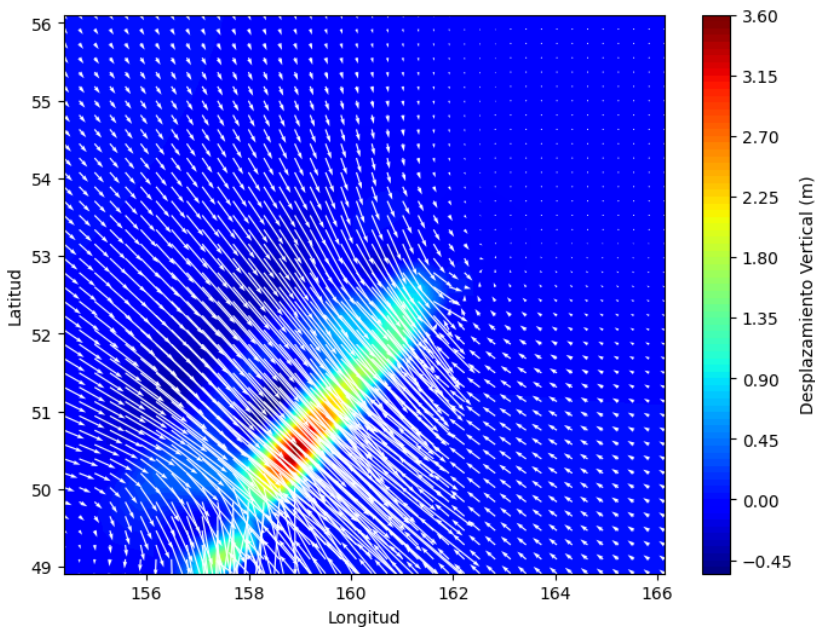


FIGURA 4. Campo de desplazamiento cosísmico generado por el terremoto de M_w 8.8 de Kamchatka.

Nota: Las flechas en la Figura 4 representan el desplazamiento horizontal al causado por el terremoto y los colores representan el desplazamiento vertical.

La Figura 5 muestra que la deformación volumétrica generada por el terremoto en la superficie presentó un patrón caracterizado por la tensión en el sector noreste del área de la ruptura, compresión en las proximidades del borde superior del área epicentral y una zona de tensión más pronunciada hacia el sureste. La deformación en dirección norte exhibe ciertas similitudes morfológicas con la deformación volumétrica; sin embargo, los valores relativos difieren en cierta medida. En cuanto a la deformación hacia el este, se observa compresión en las cercanías del epicentro y hacia el suroeste, mientras que la tensión se localiza principalmente al oeste y sureste del epicentro. Finalmente, la deformación en dirección noreste revela compresión marcada al suroeste y sur del epicentro, acompañada de zonas de tensión hacia el oeste y noreste del mismo.

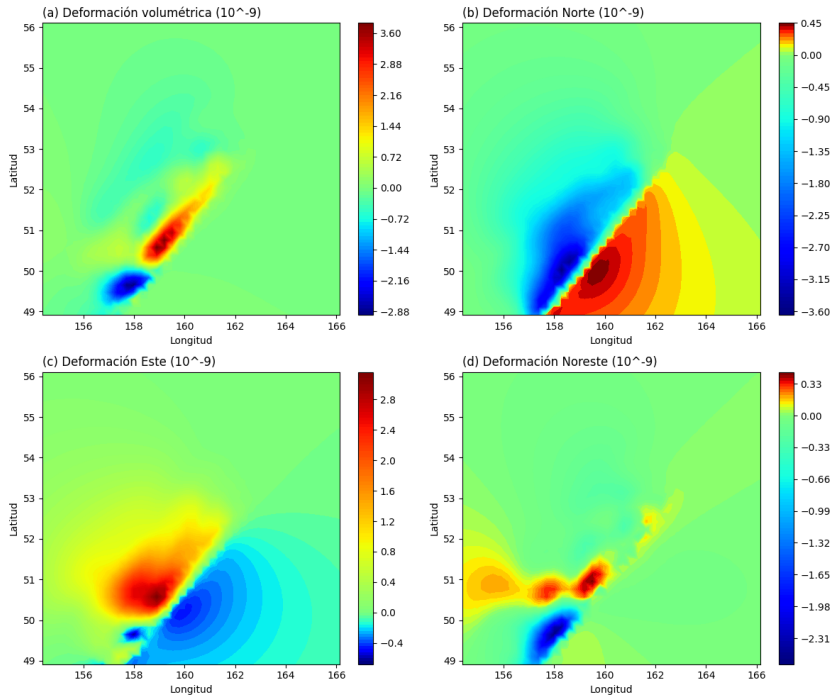


FIGURA 5. Componentes de deformación generados por el terremoto de M_W 8.8 de Kamchatka. (a) Deformación volumétrica (b) Deformación hacia el norte (c) Deformación hacia el este (d) Deformación hacia el noreste.

La Figura 6 muestra que la distribución de la deformación superficial es similar a la de la deformación volumétrica, lo que indica que la deformación superficial es una sucesora de la deformación volumétrica. Al alejarse de la falla, en las zonas con deformación superficial negativa (azul), la dirección del movimiento del material coincide aproximadamente con la deformación compresiva principal, mientras que en las zonas con deformación superficial positiva (rojo), la dirección del movimiento del material coincide aproximadamente con la deformación principal.

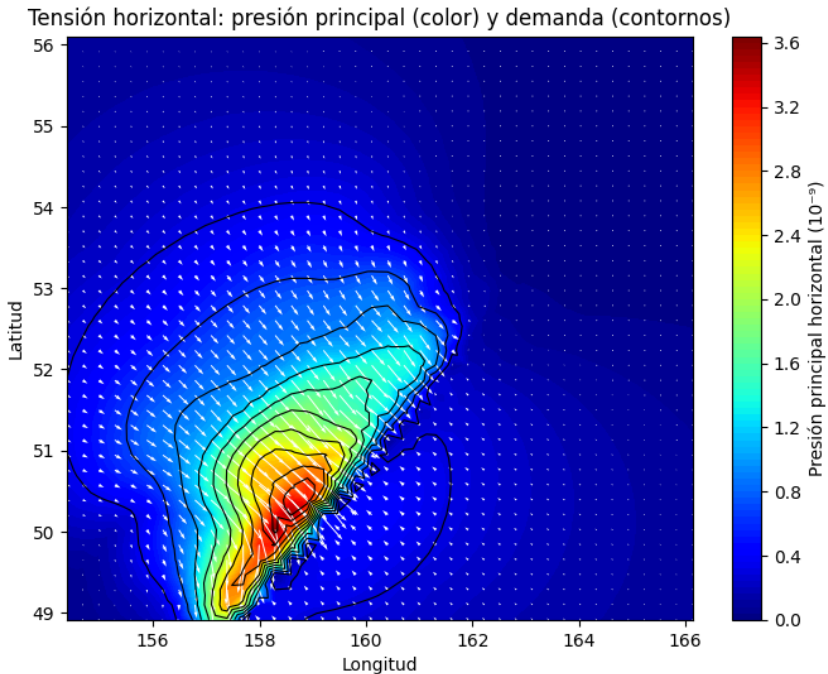


FIGURA 6. Campos de deformación principal horizontal y deformación superficial generados por el terremoto de M_W 8.8 de Kamchatka. En la figura, las flechas blancas representan la deformación compresiva principal horizontal y la deformación principal horizontal (unidad: 10^{-9}) respectivamente; el color de fondo representa la tensión horizontal y la tensión es positiva.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una solución para el mecanismo focal del terremoto de M_W 8.8 en Kamchatka, resolviendo la dispersión inicial reportada por diversas instituciones. La convergencia de las soluciones, evidenciada por el ángulo máximo de rotación espacial (28.40°) y la estabilidad de la desviación estándar calculada para diferentes soluciones iniciales, confirma que el evento corresponde predominantemente a un mecanismo de falla inversa (*megathrust*) en la interfaz de subducción entre las placas del Pacífico y la Norteamericana. Esta solución es coherente con el contexto tectónico de la región, caracterizado por ser una de las zonas de convergencia más rápidas del planeta.

Estos resultados son consistentes con los modelos reportados en grandes eventos similares, como el terremoto de Tohoku (M_W 9.1, 2011) y el terremoto de Chile (M_W 8.8, 2010), donde los mecanismos de falla inversa presentaron un patrón comparable de desplazamiento y deformación cortical. En ambos casos, los modelos de deslizamiento basados en la formulación de Okada [20] mostraron campos de levantamiento y subsidencia con simetría dipolar y máximos desplazamientos horizontales hacia la fosa; patrón reproducido de manera coherente por el modelo obtenido en este estudio.



La magnitud de la deformación volumétrica ($\sim 10^{-9}$) y los desplazamientos máximos simulados (0.7–0.9 m) son del mismo orden de magnitud que los observados en los modelos cosísmicos de Johnson & Satake [6] y Maclnnes et al. [7] para el evento M_W 9.0 de 1952 en Kamchatka, lo cual valida la representatividad física del modelo. Además, la correlación espacial entre los máximos gradientes de deformación y la distribución de réplicas ($R = 0.82$) respaldan la hipótesis de transferencia de esfuerzos estáticos (ΔCFF), un mecanismo ampliamente documentado en rupturas megafalla recientes Lay [12]; Tajima et al. [13].

Desde una perspectiva geodinámica, la ubicación del evento de 2025, adyacente al segmento que se rompió en 1952, sugiere que la región podría estar experimentando un ciclo sísmico de recurrencia con periodos de 70 ± 10 años, coherente con la tasa de convergencia de ~ 8 cm/año y la acumulación estimada de 6 m de deslizamiento. Esta observación coincide con los patrones de comportamiento cíclico descritos en el arco Kuril–Kamchatka por Pérez [8] y Zobin [1], indicando que los procesos de acoplamiento en la interfaz de subducción permanecen altamente activos.

CONCLUSIONES

En este estudio se sintetizó una solución consensuada del mecanismo focal del terremoto 8.8 en la península de Kamchatka del 29 julio 2025, a partir del análisis de las soluciones reportadas por múltiples instituciones internacionales. La solución óptima, obtenida utilizando los datos del NEIC como solución inicial, presenta parámetros consistentes con una falla inversa en la interfaz de subducción (rumbo $\sim 203.5^\circ$, buzamiento $\sim 22.7^\circ$, deslizamiento $\sim 70.1^\circ$), lo cual es consistente con la ruptura cosísmica del *megathrust* en la interfaz de subducción entre la placa del Pacífico y la microplaca de Okhotsk/Norteamericana. La baja dispersión angular (rotación espacial máxima de 28.4°) entre las soluciones valida la confiabilidad del resultado central.

El modelo de deslizamiento cosísmico, calculado a partir del modelo de ruptura finita del USGS, confirma el carácter del *megathrust* del evento. El campo de deformación resultante exhibe un patrón dipolar clásico: subsidencia significativa del bloque continental hacia el noreste del epicentro y levantamiento cortical en la losa subductada al suroeste, con desplazamientos horizontales convergentes hacia la fosa. El análisis del tensor de deformación superficial derivado (deformación volumétrica, norte, este y cortante máximo) delinea con precisión los lóbulos de compresión y dilatación asociados a la directividad de la ruptura y la geometría de la falla.

La secuencia de las réplicas se localiza predominantemente dentro del volumen cortical deformado, con una alta correlación espacial con los gradientes de esfuerzo estático (ΔCFF) transferidos por el sismo principal, lo que indica un desencadenamiento por transferencia de esfuerzos. La ubicación de este evento, adyacente al segmento que se rupturó en 1952 (M_W 9.0), sugiere una reactivación en el parche de asperezas o la ruptura de la barrera estructural. El significativo momento sísmico liberado ($\sim 1.8 \times 10^{22}$ N.m, asumiendo la M_W 8.8) el desplazamiento cosísmico estimado representa una liberación mayor de la energía acumulada desde el último evento megasísmico. No obstante, el potencial sísmico remanente en segmentos adyacentes debe ser reevaluado mediante modelos de Transferencia de Coulomb.



AGRADECIMIENTOS

No hubo fuentes de financiación para esta investigación.

El autor agradece a las diversas instituciones sismológicas por la rápida disponibilidad de datos sísmicos para el modelado de las figuras, teniendo así una respuesta rápida, como la National Earthquake Information Center (NEIC), Global Centroid Moment Tensor (GCMT), German Research Centre for Solid Earth Sciences (GFZ), Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), el Instituto de Geofísica de la CEA, el Centro de Redes Sísmicas de China y el United States Geological Survey (USGS) por los datos duros de la deformación del terremoto en Kamchatka, Rusia.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

El autor Amilcar Carrera-Cevallos realizó la metodología, adquisición de datos y la representación geográfica.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, el autor no utilizó tecnologías de IA generativa y asistida para la redacción de este artículo.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos y códigos de modelización utilizados son de código abierto. La adquisición de datos se lo hizo mediante el catálogo de la USGS para la representación de la deformación cosísmica y el desplazamiento (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) y del catálogo IRIS (<https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/tools/event/>). Las fallas activas pertenecen a GEM Global Active Faults Database (GEM GAF-DB) (<https://github.com/GEMScienceTools/gem-global-active-faults>). El mapa base pertenece a GEBCO 2020 (<https://wms.gebco.net/2020/mapserv?>). Los mecanismos focales representados en el mapa sismo tectónico son de GCMT (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).

Para la reproducción de los modelados presentados en este artículo de investigación, se encuentra disponible en Zenodo Carrera-Cevallos, A. (2025): <https://doi.org/10.5281/zenodo.18079270>

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no existe ningún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Zobin, V. M. (1996). Apparent stress of earthquakes within the shallow subduction zone near Kamchatka Peninsula. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(3), 811-820. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860030811>
- [2] USGS (2025). *M 8.8 – 2025 Kamchatka Peninsula, Russia earthquake*. U.S. Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive>
- [3] Kaila, K. L., & Krishna, V. G. (1984). Upper mantle velocity structure in the Kurile Islands, Kamchatka, and the Sea of Okhotsk regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(6), 2269-2296. <https://doi.org/10.1785/BSSA0740062269>
- [4] USGS (2025). *M 7.4 – 2025 Eastern Kamchatka, Russia earthquake*. U.S. Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000qdyl/executivehttps://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000qdyl/executive>
- [5] U.S. Geological Survey (2025). *M 7.0 – 102 km E of Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000n7n8/executive>
- [6] Johnson, J. M., & Satake, K. (1999). Asperity distribution of the 1952 great Kamchatka earthquake and its relation to future earthquake potential in Kamchatka. *Pure and Applied Geophysics*, 154(3), 541-553. <https://doi.org/10.1007/s000240050243>
- [7] MacInnes, B. T., Weiss, R., Bourgeois, J., & Pinegina, T. K. (2010). Slip distribution of the 1952 Kamchatka great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1695-1709. <https://doi.org/10.1785/0120090376>
- [8] Pérez, O. J. (2000). Kuril Islands Arc: Two seismic cycles of great earthquakes during which the complete history of seismicity ($M \geq 6$) is observed. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 1096-1100. <https://doi.org/10.1785/0119990063>
- [9] Cui, Q., Zhou, Y., Liu, L., Gao, Y., Li, G., & Zhang, S. (2023). The topography of the 660-km discontinuity beneath the Kuril-Kamchatka: Implication for morphology and dynamics of the northwestern Pacific slab. *Earth and Planetary Science Letters*, 602. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117967>
- [10] Brandl, C. C., Worthington, L. L., Roland, E. C., Walton, M. A., Nedimović, M. R., Gase, A. C., Adejedi, O., Castillo Castellanos, J., Phrampus, B. J., Bostock, M. G., Wang, K., & Oliva, S. J. (2025). Seismic imaging reveals a strain-partitioned sliver and nascent megathrust at an incipient subduction zone in the northeast Pacific. *Science Advances*, 11(29). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adt3003>
- [11] Calais, E., Han, J. Y., DeMets, C., & Nocquet, J. M. (2006). Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B6). <https://doi.org/10.1029/2005JB004253>
- [12] Lay, T. (2018). A review of the rupture characteristics of the 2011 Tohoku-oki Mw 9.1 earthquake. *Tectonophysics*, 733, 4-36. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.09.022>
- [13] Tajima, F., Mori, J., & Kennett, B. L. (2013). A review of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0): Large-scale rupture across heterogeneous plate coupling. *Tectonophysics*, 586, 15-34. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.014>
- [14] Hayes, G. P., Smoczyk, G. M., Villaseñor, A. H., Furlong, K. P., & Benz, H. M. (2020). *Seismicity of the Earth 1900–2018* (No. 3446). US Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/publication/sim3446>
- [15] Vassileva, M. S., Motagh, M., Walter, T. R., Wetzell, H. U., & Senyukov, S. L. (2020). The 29 March 2017 Yuzhno-Ozernovskoe Kamchatka Earthquake: Fault Activity in An Extension of the East Kamchatka Fault Zone as Constrained by InSAR Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(3), 1101-1114. <https://doi.org/10.1785/0120190174>
- [16] Styron, R., & Pagani, M. (2020). The GEM global active faults database. *Earthquake Spectra*, 36, 160-180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>
- [17] Swenson, J. L., & Beck, S. L. (1999). Source characteristics of the 12 November 1996 Mw 7.7 Peru subduction zone earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 154(3), 731-751. <https://doi.org/10.1007/s000240050250>



- [18] NOAA. (2025). *Estimated tsunami travel times to coastal locations*. National Centers for Environmental Information. https://www.ncei.noaa.gov/maps/ttt_coastal_locations https://www.ncei.noaa.gov/maps/ttt_coastal_locations/
- [19] Hardebeck, J. L., & Shearer, P. M. (2002). A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), 2264–2276. <https://doi.org/10.1785/0120010200>
- [20] Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135–1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>

Evaluating the Role of Urban Planning and Proximity Factors in Occupational Disease Transmission in Meat Processing Zones in Aba

Francis Ugochukwu Madu^{1*}, Chinonso Emmanuel Unagha², Gerald Chukwunweike Anozie³, Agnes Chinatu Nnamdi², Adaugo Sylvia Chukwukere², Celestine Ogechi Obele⁴

¹Department of Environmental Management and Toxicology, University of Agriculture and Environmental Sciences, Umuagwo, Nigeria.

²Department of Horticulture and Landscape Architecture, University of Agriculture and Environmental Sciences, Umuagwo, Nigeria.

³Department of Estate Management and Valuation, University of Agriculture and Environmental Sciences, Umuagwo, Nigeria.

⁴Department of Psychology, Federal University Oye-Ekiti, Nigeria.

*Corresponding Author Email: francmadu2002@gmail.com

Evaluación del papel de la planificación urbana y los factores de proximidad en la transmisión de enfermedades ocupacionales en zonas de procesamiento cárnico en Aba

Abstract

Urban slaughterhouses in developing cities often operate in densely populated environments with limited oversight, posing significant occupational health risks. This study investigated the influence of urban planning and proximity factors on disease transmission among workers in slaughterhouses across Aba, Abia State, Nigeria. The aim was to assess how spatial placement, architectural design, and environmental exposures contribute to occupational illnesses. A mixed-methods approach was employed, involving geospatial analysis, environmental monitoring, health surveys (n = 180), and facility inspections across six slaughterhouses (SH-1 to SH-6). GPS mapping revealed that four out of six facilities were within 200 meters of residential or market areas, with SH-1, SH-3, and SH-5 violating basic zoning regulations. Environmental monitoring showed elevated PM_{2.5} levels ranging from 54–94 µg/m³ (WHO limit: 25 µg/m³), with the highest levels at SH-3 (94 µg/m³). Ammonia (NH₃) and hydrogen sulfide (H₂S) concentrations exceeded safe thresholds in three facilities. Health data showed respiratory symptoms in up to 73% of workers (SH-3) and skin infections in 60% (SH-3). A strong positive correlation was observed between PM_{2.5} exposure and reported illness, and a significant negative correlation between distance to residential areas and respiratory complaints. Poor infrastructure, weak policy enforcement, and improper zoning were found to exacerbate these health risks. This study concludes that inadequate urban design and poor slaughterhouse placement significantly impacted occupational health. It recommends spatial restructuring, infrastructure upgrades, and integration of health impact assessments into abattoir planning policies in Nigeria.

Keywords: Urban planning, slaughterhouses, occupational health, air pollution, spatial proximity

1 DOI: <https://doi.org/10.18272/aci.4039>



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
02/10/2025

Aceptado /
Accepted:
15/10/2025

Publicado en línea /
Published online:
17/03/2026



Resumen

Las plantas de faenamiento urbanas en ciudades en desarrollo suelen operar en entornos densamente poblados y con una supervisión limitada, lo que genera riesgos significativos para la salud ocupacional. Este estudio investigó la influencia de la planificación urbana y los factores de proximidad en la transmisión de enfermedades entre trabajadores de plantas de faenamiento en Aba, Estado de Abia, Nigeria. El objetivo fue evaluar cómo la ubicación espacial, el diseño arquitectónico y las exposiciones ambientales contribuyen a la aparición de enfermedades ocupacionales. Se empleó un enfoque de métodos mixtos que incluyó análisis geoespacial, monitoreo ambiental, encuestas de salud ($n = 180$) e inspecciones de instalaciones en seis plantas de faenamiento (SH-1 a SH-6). El mapeo por GPS reveló que cuatro de las seis instalaciones se encontraban a menos de 200 metros de zonas residenciales o mercados, y que SH-1, SH-3 y SH-5 incumplían regulaciones básicas de zonificación. El monitoreo ambiental mostró niveles elevados de PM_{2.5} que oscilaron entre 54 y 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite de la OMS: 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), con los valores más altos en SH-3 (94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Las concentraciones de amoníaco (NH_3) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) superaron los umbrales de seguridad en tres instalaciones. Los datos de salud registraron síntomas respiratorios en hasta el 73 % de los trabajadores (SH-3) y afecciones cutáneas en el 60 % (SH-3). Se observó una fuerte correlación positiva entre la exposición a PM_{2.5} y las enfermedades reportadas, así como una correlación negativa significativa entre la distancia a las zonas residenciales y las quejas respiratorias. Se determinó que la infraestructura deficiente, la escasa aplicación de políticas y una zonificación inadecuada agravaban estos riesgos para la salud. Este estudio concluye que el diseño urbano insuficiente y la ubicación inadecuada de las plantas de faenamiento impactaron de manera significativa la salud ocupacional. Se recomienda una reestructuración espacial, mejoras de infraestructura e integración de evaluaciones de impacto en salud en las políticas de planificación de plantas de faenamiento en Nigeria.

Palabras clave: planificación urbana, plantas de faenamiento, salud ocupacional, contaminación del aire, proximidad espacial.

INTRODUCTION

The spatial organization and architectural placement of slaughterhouses within urban environments have far-reaching implications not only for environmental sustainability but also for public and occupational health. In rapidly urbanizing cities such as Aba in Abia State, Nigeria, the integration or lack thereof, of meat processing facilities within residential and commercial zones poses significant challenges [1, 2]. These challenges are exacerbated by poor urban planning, inadequate infrastructure, weak regulatory enforcement, and a general neglect of occupational health and safety protocols in the informal meat sector.

Slaughterhouses, by design, are inherently hazardous environments. Workers are regularly exposed to blood, animal waste, bioaerosols, sharp tools, and zoonotic pathogens, which can result in a variety of occupational diseases including respiratory infections, skin disorders, eye irritations, and musculoskeletal injuries [3, 4]. While several studies have focused on the hygienic practices or meat quality in abattoirs [5, 6], few have rigorously examined the urban context and spatial determinants of health outcomes



in such settings. This study attempts to bridge that gap by evaluating how the urban location, architectural condition, and proximity to sensitive land uses contribute to occupational disease risks among slaughterhouse workers in Aba.

Research conducted by Dada *et al.* [7] in Ibadan, Nigeria, indicates that unregulated slaughterhouses sited near residential areas contribute significantly to groundwater pollution and air contamination, with direct health implications for both workers and local residents. Similarly, Istifanus and Bwala [8] emphasized the role of poor waste management and inadequate zoning policies in facilitating the spread of pathogens. However, these studies rarely take into account the urban density, zoning compliance, and physical design of slaughterhouses as variables in occupational health outcomes.

International literature further underscores the importance of urban design in health-related outcomes in meat processing facilities. According to Grace *et al.* [9], abattoirs in sub-Saharan Africa often lack basic ventilation and sanitation infrastructure, with workers operating under informal conditions and with minimal access to personal protective equipment (PPE). In Bangladesh, Hasan *et al.* [10], demonstrated a strong correlation between slaughterhouse location near waterways and increased incidence of waterborne illnesses among workers and surrounding communities.

In the context of Aba, a major commercial hub known for its high population density and unregulated growth, the placement and condition of abattoirs have received little scholarly attention. Informal slaughterhouses are often embedded within market districts, lacking any spatial buffer from food stalls, homes, and public spaces [11]. These urban proximity factors amplify exposure to environmental and occupational hazards, especially in the absence of municipal oversight.

Previous research has shown that the spatial and architectural configuration of slaughterhouses has significant implications for both occupational health and urban environmental quality. Studies in developing contexts, such as Adesokan *et al.* [12] in Ibadan and Nwanta *et al.* [13] in Enugu, reported that slaughterhouses located near residential areas contribute to elevated risks of zoonotic infections, air pollution, and groundwater contamination. Similarly, urban studies from Kenya [14] and Ghana [15] highlighted how inadequate waste management and poor ventilation designs intensify health hazards for workers and nearby residents. From a planning perspective, Abada and Ngwu, [16] emphasized the absence of spatial buffers and zoning compliance in Nigerian abattoirs, leading to conflicts between residential and industrial land uses. Internationally, researches by Aluwong and Bello [17] and Von Schirnding and Yach, [18] have underscored the need for integrating health impact assessments into urban land-use planning, particularly in cities where abattoirs operate informally. However, despite these insights, there remains limited interdisciplinary research linking abattoir siting, architectural design, and property value dynamics in the context of Nigerian cities. This study therefore bridges this gap by combining urban planning, estate valuation, and environmental health perspectives to assess how the urban form and spatial positioning of slaughterhouses influence occupational health outcomes in Aba, Abia State.

This study was guided by the central research question: *How do the urban and architectural characteristics of slaughterhouses in Aba influence occupational health*



outcomes among workers and adjacent communities? To address this, the study pursued five specific objectives: to evaluate the spatial distribution and proximity of slaughterhouses to sensitive land uses such as residences, markets, and schools; to assess the architectural and environmental design characteristics of slaughterhouse facilities, including ventilation, drainage, and layout; to measure key environmental indicators such as airborne particulates and gases associated with occupational health risks; to determine the relationship between proximity, environmental exposure, and self-reported health outcomes among slaughterhouse workers; and to explore institutional perspectives on urban planning enforcement, abattoir regulation, and environmental health management.

MATERIALS AND METHODS

Study Area

This study was conducted in Aba, a densely populated commercial city in Abia State, Nigeria which lies between Latitude 5° 06' 23.69" N and Longitude 7° 22' 0.01" E. Aba is characterized by rapid urbanization, mixed-use land patterns, and several informal slaughterhouses scattered across residential, industrial, and market districts. The city's geography made it suitable for studying the intersection of urban planning, architectural facility conditions, and occupational health in slaughterhouses.

Study Design and Logical Framework

The study followed a sequential mixed-methods design that logically connected the problem definition, data collection, and analysis stages. The research began with spatial identification of slaughterhouses to establish proximity relationships, followed by environmental monitoring to quantify exposure levels. Parallel to this, health and perception data were collected from slaughterhouse workers to capture self-reported occupational symptoms. Architectural assessments and key informant interviews provided contextual understanding of design and policy dimensions. Quantitative datasets were analyzed statistically to identify correlations between proximity, environmental exposure, and health outcomes, while qualitative data supported interpretation and triangulation. This design ensured methodological transparency and allowed replication in similar urban contexts.

Selection of Slaughterhouses

A total of six slaughterhouses were purposively selected within the Aba metropolis based on three main criteria: active operation status, accessibility for observation and data collection, and variation in location with respect to proximity to residential, commercial, or industrial areas. To maintain confidentiality and ensure objective analysis, each site was anonymized and labeled SH-1 through SH-6.

GPS and GIS Mapping

The geographic coordinates of each selected slaughterhouse were accurately recorded using a Garmin eTrex 32x handheld GPS device, ensuring precise spatial referencing.



These coordinates formed the basis for subsequent spatial analyses conducted with ArcGIS 10.8 software [19]. Spatial data included not only the exact location of the slaughterhouses but also their proximity to sensitive land uses (residential areas, markets, schools, and other public infrastructure). To evaluate the potential impact zones and assess spatial conformity with urban planning standards, buffer analyses were performed at incremental distances of 100 meters, 250 meters, and 500 meters around each facility. These buffer zones enabled the identification of overlapping land uses and potential exposure risks to nearby populations, thereby offering a comprehensive spatial understanding of each slaughterhouse's placement within the urban fabric of Aba metropolis.

Structured Questionnaires

A structured, pre-tested, and interviewer-administered questionnaire as described by Arita *et al.* [20] was used to collect data from workers across all six selected slaughterhouses, with 30 respondents sampled per site, resulting in a total sample size of 180 participants. The questionnaire was designed to capture both quantitative and qualitative data, and it was divided into key sections that included demographic information (age, gender, and educational background), occupational history (job role, years of experience, and work hours), self-reported health symptoms; particularly focusing on respiratory issues, skin conditions, and musculoskeletal disorders, as well as workers' perceptions of environmental hazards present in their workplace (smoke, odors, waste, noise, and air quality). All responses were collected anonymously to protect participant confidentiality and encourage honest reporting. The completed questionnaires were coded and analyzed using Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) version 25.0, which allowed for descriptive statistics, correlation analysis, and interpretation of patterns between exposure conditions and reported health outcomes.

Air Quality Indicators

Environmental measurements were taken during active slaughter operations (between 7:00 a.m. and 11:00 a.m.) at each site. In this study, environmental air quality measurements were taken at each of the six selected slaughterhouses to objectively assess occupational exposure to airborne pollutants commonly associated with meat processing activities. An Aerocet 531 particulate monitor was used to measure concentrations of particulate matter, including PM_{2.5}, which are known to penetrate deep into the respiratory tract and pose serious health risks with prolonged exposure. The Aerocet monitor was calibrated prior to data collection and operated during peak activity hours at each site to ensure representative readings [21]. For gaseous pollutants, ammonia (NH₃), hydrogen sulfide (H₂S) and carbon dioxide (CO₂) levels were measured using Aeroqual 300 gas detectors, which provided digital readings and were handheld for flexibility during on-site monitoring. Measurements were taken at multiple time intervals and locations within each facility to account for spatial and temporal variability [22]. All instruments were used in accordance with the manufacturers' operational guidelines to ensure data reliability. These environmental readings were later analyzed alongside worker health data to examine correlations between pollutant levels and reported symptoms, offering a transparent, evidence-based understanding of the occupational health risks present in Aba's slaughterhouses.



Odor assessment was conducted using a subjective 5-point Likert scale, allowing both slaughterhouse workers and members of the research team to rate the intensity of perceived odors during active operational hours [23]. The scale ranged from 1 to 5, where 1 represented “no odor,” 2 “slightly noticeable,” 3 “moderate,” 4 “strong,” and 5 “overpowering.” Workers were asked to rate odor levels based on their daily experiences within the facility, while researchers recorded their own ratings during site visits, particularly during peak slaughtering periods when emissions were highest. This dual approach was employed to capture both long-term user perceptions and immediate field impressions, recognizing that odor perception can be influenced by exposure duration, adaptation, and environmental factors such as airflow and temperature. Although subjective, this method provided valuable insight into the nuisance level and environmental discomfort experienced at each site. The ratings from both groups were compiled, averaged, and compared across all six slaughterhouses to identify facilities with the most severe odor problems, which were then analyzed in relation to infrastructure quality, proximity to residential areas, and reported health complaints.

Temperature and Ventilation

Temperature within each slaughterhouse was measured using a handheld digital thermometer (table 1), with readings taken during peak operational periods at multiple interior points to capture variations influenced by crowding, equipment use, and ambient conditions [24]. Ventilation was assessed through direct observation, focusing on the design type, classified as either natural (e.g., open windows, vents) or mechanical (e.g., fans, exhaust systems). The evaluation also included the number and positioning of air openings, as well as the quality of airflow observed during operations [25]. While no specialized airflow measurement devices were used, ventilation effectiveness was judged qualitatively based on air movement indicators such as odor dispersion, heat buildup, and visible air circulation. This combined temperature and ventilation assessment provided a practical understanding of the indoor environmental conditions experienced by workers in each facility.

Infrastructure Assessment Checklist

A standardized observation checklist, adapted from the Nigeria’s Federal Ministry of Environmental (FMEnv) abattoir policy guidelines, was employed to systematically assess environmental and structural conditions across all six slaughterhouses [26]. This checklist included key indicators such as the quality and functionality of drainage systems, methods of solid and liquid waste disposal, the condition of floors and roofing materials, the availability and reliability of water supply, and the overall structural compliance of each facility with relevant urban planning and public health regulations. Observations were made during peak operational hours to ensure accurate representation of daily practices and environmental performance.

Key Informant Interviews

Six urban planners and two public health officials were interviewed using a semi-structured interview guide designed to explore key issues related to zoning enforcement, abattoir regulation, and broader urban development challenges within the Aba



metropolis as described by [27]. The interviews aimed to gather expert perspectives on the systemic factors influencing the siting and operation of slaughterhouses, as well as the implications for public and occupational health. With informed consent from all participants, interviews were audio-recorded, transcribed verbatim to preserve accuracy, and subsequently coded and analyzed using NVivo 12 software. This facilitated a rigorous thematic analysis, allowing for the identification of recurring patterns, stakeholder concerns, and institutional gaps affecting urban planning and environmental governance in the context of meat processing zones.

Table 1. Summary of Instruments and Environmental Measurement Parameters

Parameter	Instrument Used	Measurement Range	Detection Limit / Accuracy	Sampling Frequency	Calibration Method / Notes
PM _{2.5} / PM ₁₀	<i>Aerocet 5315 Aerosol Mass Monitor</i> (Met One Instruments, USA)	0.001–100 mg/m ³	±5% of reading or ±0.003 mg/m ³	10-second interval over 30-minute sessions	Calibrated with zero filter and factory-set gravimetric reference before each field day
Ammonia (NH ₃)	<i>Aeroqual Series 300 Portable Gas Detector</i> (Aeroqual Ltd., New Zealand) with NH ₃ sensor head	0–100 ppm	±2% of full scale	Continuous logging at 1-min intervals	Zero and span calibration using certified 10 ppm NH ₃ gas before sampling
Hydrogen Sulfide (H ₂ S)	<i>Aeroqual Series 300 Portable Gas Detector</i> with H ₂ S sensor head	0–50 ppm	±2% of full scale	Continuous logging at 1-min intervals	Zero calibrated with clean ambient air; span verified with 5 ppm H ₂ S calibration gas
Carbon Dioxide (CO ₂)	<i>Aeroqual Series 300 Portable Gas Detector</i> with CO ₂ sensor head	0–5,000 ppm	±50 ppm or ±5% of reading	30-second interval	Auto-calibration to baseline ambient CO ₂ at start of each session
Temperature	<i>Digital Thermometer</i> (Testo 925, Germany)	-50°C to +400°C	±0.5°C	Single readings every 30 minutes	Factory-calibrated; cross-checked with laboratory thermometer
Odor Intensity	<i>5-point Subjective Likert Scale</i>	N/A	N/A	Single rating per observation period	Averaged from worker and researcher assessments to minimize bias



Data Analysis

Quantitative data obtained from the worker surveys and environmental measurements were first organized using Microsoft Excel and then analyzed using SPSS version 25.0. The analysis included means, standard deviations, and frequency distributions to summarize health symptoms, environmental exposures, and workplace characteristics. Pearson's correlation analysis was employed to examine the associations between proximity-related variables (e.g., distance to residential areas) and reported health outcomes, while one-way ANOVA was used to identify statistically significant differences in environmental conditions and health indicators across the six slaughterhouse locations. In parallel, geographic information system (GIS) data were processed to produce proximity heat maps, zoning overlays, and density maps, which visualized the spatial relationships between slaughterhouses and surrounding land uses. These spatial outputs helped to contextualize environmental exposure risks within the urban fabric. Additionally, qualitative data from key informant interviews were analyzed thematically using NVivo 12, allowing for the extraction of contextual insights related to urban planning practices, policy enforcement gaps, and systemic challenges in regulating abattoir operations within the city.

Ethical Considerations

Ethical approval for this study was obtained from the Abia State University Research Ethics Committee, ensuring that all procedures met established ethical standards for research involving human participants. Prior to data collection, all participants were provided with detailed information about the study's purpose, procedures, and their rights, after which they gave written informed consent. Participation was entirely voluntary, and respondents were assured that they could withdraw from the study at any time without consequence. To maintain confidentiality and protect privacy, all data were collected anonymously, and no personally identifiable information was recorded. Additionally, no invasive procedures were involved at any stage of the research.

RESULTS

This section presents the findings from spatial analyses, environmental sampling, surveys, and observational assessments conducted across six slaughterhouses (SH-1 to SH-6) in Aba, Abia State. Results are organized into thematic areas: site characteristics and urban proximity, infrastructure conditions, air quality and environmental hazards, occupational health outcomes, and statistical relationships between urban factors and health risks.

Slaughterhouse Site Characteristics and Urban Proximity

Table 2 shows the GPS-based spatial data and proximity measurements. Three slaughterhouses (SH-1, SH-3, and SH-5) were located within 150 meters of residential areas, while four were within 300 meters of active market centers. These facilities were also embedded in high-density urban zones.



Table 2. Summary of Proximity Characteristics of Slaughterhouses

Slaughterhouse	Distance to Nearest Residence (m)	Distance to Market (m)	Adjacent Land Use	Zoning Compliance
SH-1	95	190	Residential	No
SH-2	330	490	Light Industrial	Yes
SH-3	130	220	Mixed Commercial	No
SH-4	460	310	Commercial	Yes
SH-5	100	140	Residential	No
SH-6	280	360	Market District	No

Infrastructure and Facility Conditions

Observational data (Table 3) revealed that most slaughterhouses had poor drainage systems and lacked designated waste disposal structures. SH-1, SH-3, and SH-5 operated in buildings with cracked floors, rusty roofs, and no mechanical ventilation. Only SH-2 and SH-4 partially complied with urban planning and sanitation standards.

Table 3. Infrastructure Quality Assessment

Facility	Drainage	Roof Condition	Floor Type	Ventilation	Waste Disposal Method	Water Supply	Compliance
SH-1	Poor	Rusty Zinc	Bare Concrete	None	Open Dumping	Irregular	No
SH-2	Fair	Asbestos	Concrete	Natural	Pit	Reliable	Partial
SH-3	Poor	Leaking Zinc	Cracked Cement	None	Discharge to Gutter	Irregular	No
SH-4	Good	Metal Roofing	Concrete Concrete	Mechanical	Incineration	Reliable	Yes
SH-5	Poor	Rusty Zinc	Bare Concrete	None	Open Drain	Irregular	No
SH-6	Fair	Corrugated Iron	Concrete	Natural	Pit	Reliable	Partial

Environmental Hazards and Air Quality

Environmental measurements (Figure 1) revealed elevated concentrations of particulate matter (PM2.5) and gas pollutants at several sites, especially SH-1, SH-3, and SH-5. Odor levels were highest at SH-1 and SH-3, rated as “very offensive” by over 85% of respondents.

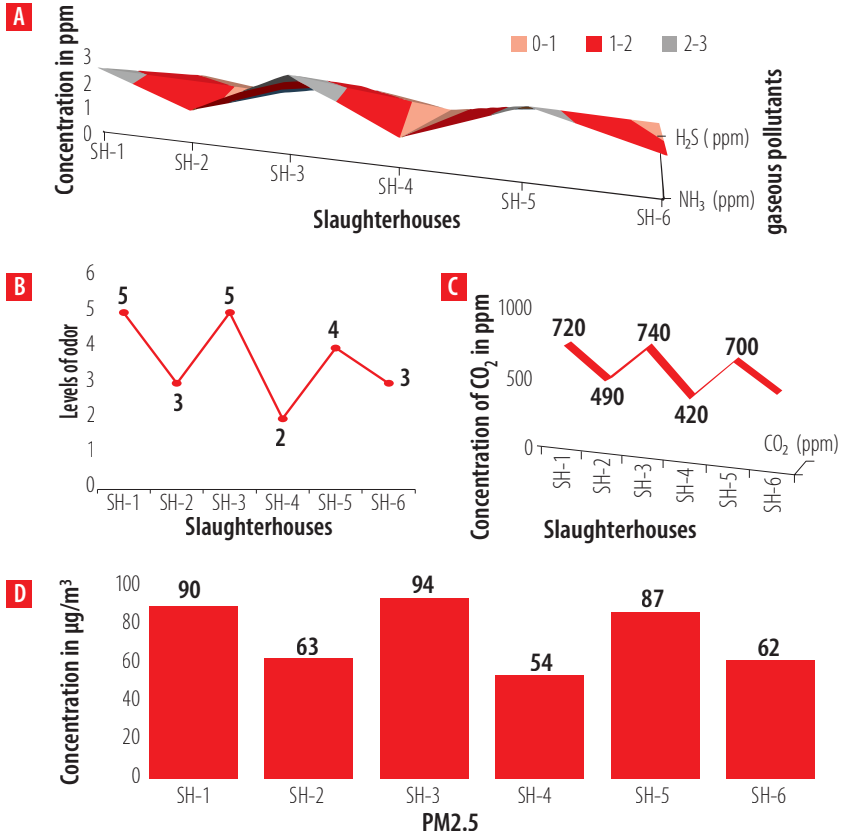


Figure 1. Highest Pollutant and Odor Levels Occurred at SH-1 and SH-3. A = Concentration of Ammonia (NH₃) and hydrogen sulfide (H₂S) in parts per million, B = Level of odor rated between 1- 5 scale. C = Concentration of Carbon dioxide in parts per million. D = Concentration of Particulate Matter (PM_{2.5}) in µg/m³

Occupational Health Outcomes

Survey responses indicated a high prevalence of respiratory and skin-related health complaints among workers in poorly located and inadequately designed facilities. SH-3 had the highest rate of reported occupational illnesses, followed by SH-1 and SH-5 (Figure 2).

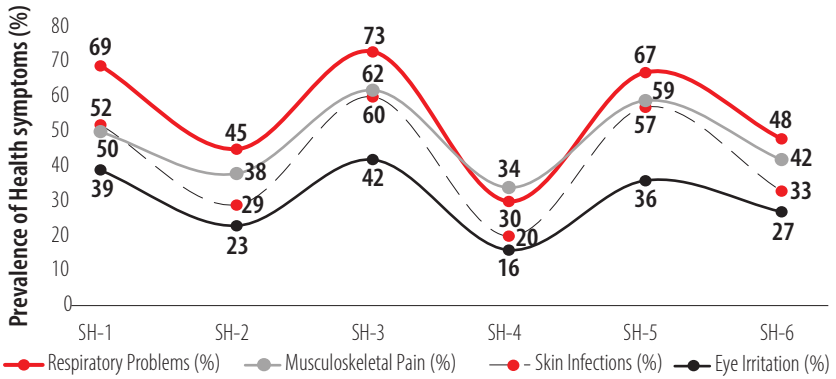


Figure 2. Highest Rates of Respiratory and Skin-related Illnesses were Reported at SH-3, SH-1, and SH-5 (n = 180)

Perception of Environmental and Health Risks

A majority of workers reported feeling exposed to unsafe conditions, citing poor sanitation, heat, waste proximity, and lack of personal protective equipment (Figure 3).



Figure 3. Majority of Workers Reported Unsafe Conditions



Correlation Analysis

Statistical analysis revealed significant relationships between proximity-related urban planning factors and occupational health outcomes among slaughterhouse workers. Specifically, proximity to residential areas showed a strong negative correlation with the incidence of reported respiratory problems ($r = -0.66, p < 0.01$), indicating that the closer a slaughterhouse was to residential zones, the higher the prevalence of respiratory complaints (Figure 4). Additionally, PM_{2.5} concentrations exhibited a strong positive correlation with the overall illness rate among workers ($r = 0.74, p < 0.001$), suggesting that elevated levels of fine particulate matter were closely associated with increased health risks. Furthermore, zoning compliance was found to be negatively correlated with both odor intensity and ammonia (NH₃) concentration levels ($r = -0.61, p < 0.05$), highlighting that facilities failing to adhere to urban planning regulations experienced higher environmental pollution and odor nuisance. These findings underscore the critical role of urban design, zoning enforcement, and environmental monitoring in mitigating occupational health risks in slaughterhouse environments.

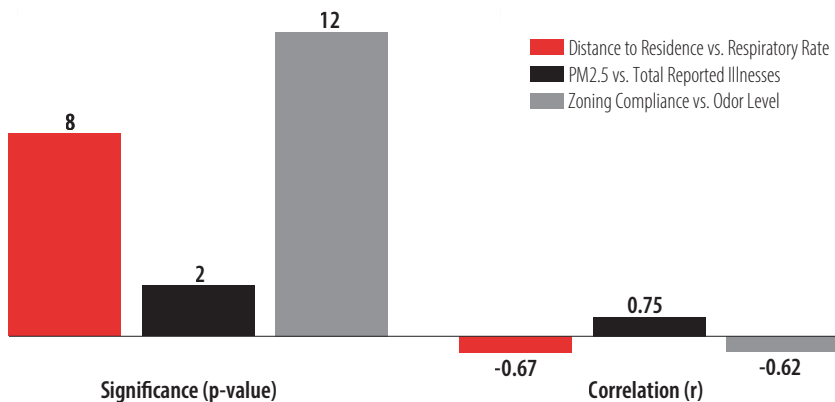


Figure 4. Higher PM_{2.5} Levels at SH-3 and SH-5 Correlate with Elevated Respiratory Complaints

Qualitative Insights

Key informant interviews with city planners and environmental health officials revealed several systemic challenges affecting the regulation of slaughterhouse operations in Aba. Notably, only two of the six facilities had undergone zoning audits within the past three years, indicating weak oversight and regulatory compliance. Respondents highlighted that enforcement of abattoir planning and zoning laws was frequently undermined by political interference, lack of institutional autonomy, and chronic underfunding of urban planning and environmental health departments. Additionally, stakeholders emphasized the urgent need for a multi-pronged approach that includes the relocation of poorly sited slaughterhouses, retrofitting of existing facilities to meet health and environmental standards, and strict enforcement of spatial buffer zones to reduce exposure risks for both workers and nearby residents.

DISCUSSION

The findings of this study provide compelling evidence that the location, architectural design, and infrastructure quality of meat processing facilities in Aba, Abia State, significantly influence occupational disease transmission among workers. While these results align with global research, they offer context-specific insight into how planning failures and weak infrastructure amplify health risks in densely populated African cities.

Urban Proximity and Health Risks

Most facilities examined were situated within 150 meters of residential neighborhoods and market centers, in clear violation of basic zoning standards. Such close siting intensifies exposure to odor, air pollution, and wastewater, thereby increasing the risk of bioaerosol inhalation and contact with contaminated runoff. Similar spatial health dynamics have been documented in Ede, Nigeria [28] and Accra, Ghana [29], where informally sited abattoirs contribute substantially to local health burdens. The strong negative correlation between proximity to homes and reported respiratory symptoms ($r = -0.66$, $p < 0.01$) reinforces the view that distance from residential areas is a key determinant of occupational well-being. Workers in closely situated facilities not only face higher exposure risks but may also act as transmission links between abattoirs and surrounding communities.

Infrastructure and Environmental Exposure

The physical condition of many facilities—particularly SH-1, SH-3, and SH-5—was notably poor, with inadequate drainage, ventilation, and waste containment. These deficiencies explain the elevated concentrations of $PM_{2.5}$, ammonia, and hydrogen sulfide recorded during peak processing hours. Such pollutants are known irritants of the respiratory tract and skin [30] and correspond with the high incidence of cough, breathlessness, and dermatitis among workers. By contrast, facilities with improved layout and partial compliance with planning standards (SH-2 and SH-4) exhibited lower pollutant levels and fewer health complaints. This trend aligns with observations from [31] in Bangladesh, emphasizing that sound facility design can mitigate occupational health risks even in low-resource settings.

Occupational Illness Patterns

Illness patterns observed—chiefly respiratory disorders, skin infections, and musculoskeletal pain—mirror findings from previous occupational health studies in low- and middle-income countries [6, 9]. These conditions are typically linked to poor ventilation, repetitive motion, long standing hours, and inadequate protective gear, all of which were common in the surveyed facilities. The high prevalence of respiratory symptoms, particularly at SH-3 (73%) and SH-1 (69%), corresponds closely with elevated $PM_{2.5}$ levels. The positive correlation between air pollutant exposure and illness rates ($r = 0.75$, $p < 0.002$) underscores that environmental conditions within these operations directly influence worker health.



Policy and Planning Gaps

Interviews with urban planners and environmental health officials revealed deep-seated governance challenges. Weak law enforcement, limited institutional coordination, and inadequate funding have allowed substandard and informal abattoirs to proliferate in vulnerable districts. The absence of spatial buffers and irregular zoning audits have created environments where occupational and public health risks persist unchecked. These systemic lapses highlight the urgent need for policy reforms that prioritize health-centered urban design—enforcing minimum distance regulations, mandating infrastructure upgrades, and embedding slaughterhouse-specific building codes into municipal planning frameworks.

Implications for Urban Health Planning

This research underscores the importance of integrating health impact assessments into urban planning for meat processing facilities. The evidence suggests that the spatial siting and architectural form of these operations are as critical to health outcomes as hygiene practices within them. Promoting urban health in Aba requires a transition from reactive sanitation measures to proactive, design-based planning. Slaughterhouse development must therefore be reimagined as a public health priority—balancing operational efficiency with the protection of workers, consumers, and nearby residents.

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

This study has demonstrated that the urban placement and architectural design of slaughterhouses in Aba, Abia State, played a critical role in shaping occupational health outcomes among meat processing workers. The clustering of poorly planned, inadequately ventilated, and improperly zoned slaughter facilities within residential and commercial areas has led to elevated environmental hazards, including excessive air pollutants, offensive odors, and direct human exposure to waste and bioaerosols. Workers in slaughterhouses located closer to residential areas and operating in structurally compromised buildings exhibited significantly higher rates of respiratory problems, skin infections, and musculoskeletal issues. These patterns were strongly linked to poor infrastructure, lack of spatial separation from sensitive land uses, and systemic failures in urban planning enforcement. The findings underscore the urgent need for an integrated, health-sensitive approach to urban planning and facility design in the meat processing sector. Without such interventions, the current slaughterhouse system in Aba will continue to pose severe risks not only to occupational groups but to the broader public as well.

Based on the findings of this study, several evidence-based recommendations are proposed to address the occupational and environmental health risks associated with poorly planned slaughterhouses in Aba. First, urban planning reforms should be implemented to enforce strict zoning regulations that establish minimum setback distances between slaughterhouses and sensitive land uses, supported by a municipal abattoir siting framework guided by GIS modeling and environmental risk assessments. Second, facilities that are non-compliant or poorly located such as SH-1, SH-3, and SH-5, should be relocated to designated agro-industrial zones, while existing facilities must



be retrofitted with improved drainage systems, proper roofing, mechanical ventilation, and effective waste containment structures. Third, environmental monitoring must be institutionalized through routine air quality checks for PM2.5, ammonia (NH₃), and hydrogen sulfide (H₂S), alongside the establishment of local government environmental health units empowered to conduct inspections and enforce regulations. Fourth, worker protection must be prioritized by ensuring the provision of personal protective equipment (PPE), regular health screenings, and mandatory occupational safety training. Licensing of slaughterhouses should be tied to periodic occupational health audits. Fifth, urban planning processes should become more data-driven, integrating GIS and health surveillance data into abattoir siting, relocation, and risk communication strategies. Active community engagement is also essential to raise public awareness about the health implications of proximity to slaughterhouses. Finally, policy integration is needed at the state level to embed urban health considerations into planning legislation and the Abia State Environmental Sanitation Policy, while aligning local slaughterhouse regulations with FMEV guidelines to ensure compliance with international best practices for both structural design and spatial placement.

While this study provides valuable insights into the environmental and economic impacts of slaughterhouse externalities on residential property values and livability in Aba, certain limitations must be acknowledged. First, environmental measurements such as air quality and odor intensity were taken during a single time period, which may not capture seasonal or operational variations in emission levels. Second, odor assessment relied partly on subjective Likert-scale ratings from both researchers and residents, introducing potential perception bias despite standardized evaluation procedures. Third, property value data were based on reported rents and market appraisals at the time of survey, which may fluctuate with broader economic trends. Additionally, while spatial analyses using GIS provided strong locational context, they did not fully account for micro-environmental variables such as wind direction or informal waste management practices. Future studies should therefore adopt longitudinal designs, integrate continuous monitoring tools, and incorporate more objective sensory and valuation metrics to strengthen causal inferences.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Abattoirs workers in Aba (the subjects) who contributed immensely in making the completion of this project possible.

FUNDING

No external funding was received for this study

AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

F.U. Madu: Writing – original draft, Visualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **C.E. Unagha:** Writing – review & editing, Validation and



supervision **G.C. Anozie:** Writing – review & editing, Validation, Resources, methodology. **A.C. Nnamdi:** Writing – review & editing, investigation, Resources, methodology. **A.S. Chukwukere:** Writing – review & editing, Resources, methodology. **C. O. Obele:** methodology, analysis and Writing – review & editing

DATA AVAILABILITY STATEMENT

Data are available upon reasonable request to the corresponding author (in exceptional cases).

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

DECLARATION OF GENERATIVE AND AI-ASSISTED TECHNOLOGIES IN THE WRITING PROCESS

For this work, the authors used ChatGPT in order to improve the readability of some sentences. Afterwards, the authors reviewed and edited the content as deemed necessary and take full responsibility for the final version and the published content.

REFERENCES

- [1] Ezechi, E. H., Nwabuko, C. G., Enyinnaya, O. C., & Babington, C. J. (2017). Municipal solid waste management in Aba, Nigeria: Challenges and prospects. *Environmental Engineering Research*, 22(3), 231–236. <https://doi.org/10.4491/ eer.2017.100>
- [2] Aliyu, A. A., & Amadu, L. (2017). Urbanization, cities, and health: The challenges to Nigeria – A review. *Annals of African Medicine*, 16(4), 149–158. https://doi.org/10.4103/aam.aam_1_17
- [3] Abdullahi, A., Hassan, A., Kadarman, N., Yakubu, J., Adeyemo, O., & Lua, P. L. (2016). Occupational hazards among abattoir workers associated with noncompliance to meat processing and waste disposal laws in Malaysia. *Risk Management and Healthcare Policy*, 9, 157–163. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S98271>
- [4] Kasaeinasab, A., Jahangiri, M., Karimi, A., Tabatabaei, H. R., & Safari, S. (2017). Respiratory disorders among workers in slaughterhouses. *Safety and Health at Work*, 8(1), 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.04.002>
- [5] Adeyemo, O. K., Ayodeji, I. O., & Aiki-Raji, C. O. (2002). The water quality and sanitary conditions in a major abattoir (Bodija) in Ibadan, Nigeria. *African Journal of Biomedical Research*, 5, 51–55.
- [6] Okoli, C. G., Okoli, I. C., Okorondu, U. V., & Opara, M. N. (2006). Environmental and public health issues of animal food products delivery system in Imo State, Nigeria. *Online Journal of Health and Allied Sciences*, 2, 2.
- [7] Dada, O. T., Odufuwa, B. O., Badiora, A. I., Agbabiaka, H. I., Ogunseye, N. O., & Samuel, O. S. (2020). Environmental hazard and health risks associated with slaughterhouses in Ibadan, Nigeria. *Environmental Hazards*, 20(2), 146–162. <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1747382>
- [8] Istifanus, V., & Bwala, H. B. (2017). Infrastructure challenges: The review of environmental and health implication of abattoir operation in a developing country. *Journal of Research in Humanities and Social Science*, 5(6), 60–72.
- [9] Grace, K., Davenport, F., Hanson, H., Funk, C., & Shukla, S. (2015). Linking climate change and health outcomes: Examining the relationship between temperature, precipitation and birth weight in Africa. *Global Environmental Change*, 35, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.010>
- [10] Hasan, M. A., Uddin, M. B., & Ahmed, S. S. U. (2024). Knowledge, attitudes and practices of meat hygiene among slaughterhouse workers and retail meat sellers in Bangladesh. *Heliyon*, 10(22), e40066. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40066>
- [11] Ovuru, K. F., Izah, S. C., Ogidi, O. I., Imarhiagbe, O., & Ogwu, M. C. (2023). Slaughterhouse facilities in developing nations: Sanitation and hygiene practices, microbial contaminants and sustainable management system. *Food Science and Biotechnology*, 33(3), 519–537. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01406-x>
- [12] Adesokan, H. K., Akinseye, V. O., & Sulaimon, M. A. (2018). Knowledge and practices about zoonotic tuberculosis prevention and associated determinants among livestock workers in Nigeria. *PLOS ONE*, 13(6), e0198810. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198810>
- [13] Nwanta, J., Onunkwo, J., & Ezenoduka, E. (2010). Analysis of Nsukka metropolitan abattoir solid waste and its bacterial contents in southeastern Nigeria: Public health implication. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 65(1), 21–26. <https://doi.org/10.1080/19338240903390263>
- [14] Kagira, J. M., Njuki, P. N., Maingi, N., Githigia, S. M., Ng'ang'a, J. C., & Karuga, J. W. (2010). Characteristics of the smallholder free-range pig production system in western Kenya. *Tropical Animal Health and Production*, 42(5), 865–873. <https://doi.org/10.1007/s11250-009-9500-y>
- [15] Bienibuor, A. K., Preko, K., Aning, A. A., Menyeh, A., Wemegah, D. D., & Appiah, M. K. (2025). Groundwater potential and quality assessment of the Oti Pendjari and Obosum Groups of the Atebubu municipality. *Applied Water Science*, 15, Article 195. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02309-1>
- [16] Abada, I. M., & Ngwu, E. C. (2019). Corruption, governance, and Nigeria's uncivil society, 1999–2016. *Análise Social*, 54(231 (2)), 386–408. <https://www.jstor.org/stable/26747550>
- [17] Aluwong, T., & Bello, M. (2010). Emerging diseases and implications for Millennium Development Goals in Africa by 2015: An overview. *Veterinaria Italiana*, 46(2), 137–145.
- [18] Von Schirmding, Y., & Yach, D. (2002). Unhealthy consumption threatens sustainable development. *Revista de Saúde Pública*, 36(4), 379–382. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102002000400001>

- [19] Fator, M., & Zomrawi, N. (2015). Etrex Garmin GPS receiver accuracy testing. *International Journal of Recent Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(5).
- [20] Arita, S., Ba, M. F., Traoré, Z., Bonnet, E., Faye, A., & Ridde, V. (2023). Use of interviewer-administered telephone surveys during infectious disease outbreaks, epidemics and pandemics: A scoping review. *BMJ Global Health*, 8(5), e011109. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2022-011109>
- [21] Madu, F. U., Akubugwo, E. I., Ogbulie, T. E., Uhegbu, F. O., Agoro, E. S., Nwosu, O. U., Ugenyi, A. U., Ononogbo, P. C., & Madu, M. C. (2025a). Characterization of particulate matter exposure and health implications in poorly ventilated chemical retail outlets: Evidence from Ogbo-Ogwu Market. *Pollution*, 2025a. <https://doi.org/10.22059/poll.2025.382761.2566>
- [22] Madu, F. U., Akubugwo, E. I., Ogbulie, T. E., Uhegbu, F. O., Agoro, E. S., Nwosu, O. U., Ugenyi, A. U., Ononogbo, P. C., & Madu, M. C. (2025b). Air quality and health risks in chemical supply shops in Southeastern Nigeria. *Toxicology and Industrial Health*, 41(5). <https://doi.org/10.1177/07482337251349359>
- [23] Dal Bò, E., Gentili, C., Spoto, A., Bruno, G., Castellani, A., Tripodi, C., Fischmeister, F. P. S., & Cecchetto, C. (2021). The social odor scale: Development and initial validation of a new scale for the assessment of social odor awareness. *PLoS ONE*, 16(12), e0260587. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260587>
- [24] Alif, S., & Fauzi, A. (2020). Association between surface air temperature and land use on the campus scale. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 5(3), 161–169. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2020.5.3.5187>
- [25] Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C. L., et al. (Eds.). (2009). *Natural ventilation for infection control in health-care settings*. World Health Organization. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143277/>
- [26] FMEEnv. (2005). *Policy guidelines on market and abattoir sanitation*. Federal Ministry of Environment, Abuja, Nigeria. <https://ehcon.gov.ng/wp-content/uploads/2020/05/POLICY-GUIDELINES-ON-MARKET-AND-ABATTOIR-SANITATION-2005-1.pdf>
- [27] Scott, C., Bor, N., Reyher, K. K., Tasker, A. J., Buller, H., Bueno, I., et al. (2025). A qualitative exploration of the enablers of and barriers to conformance with antibiotic withdrawal periods on smallholding, peri-urban pig farms in Kiambu County, Kenya. *PLoS ONE*, 20(1), e0312362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312362>
- [28] Adeniyi, L., Ayodeji, O., Folorunso, S., & Adesoye, O. (2025). Assessing environmental quality and health implications of slaughterhouses' operation within urban residential settings of a developing country. *Urban Sustainability and Society*, 2, 178–195. <https://doi.org/10.1108/USS-08-2024-0052>
- [29] Bempah, S., Curtis, A., Awandare, G., Ajayakumar, J., & Nyakoe, N. (2022). The health-trash nexus in challenging environments: A spatial mixed methods analysis of Accra, Ghana. *Applied Geography*, 143, 102701. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102701>
- [30] Bălă, G. P., Răjnovanu, R. M., Tudorache, E., Motișan, R., & Oancea, C. (2021). Air pollution exposure—the (in)visible risk factor for respiratory diseases. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(16), 19615–19628. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13208-x>
- [31] OECD/UNCTAD. (2023). *Production transformation policy review of Bangladesh: Investing in the future of a trading nation*. OECD Development Pathways. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/8b925b06-en>

Distribución geográfica del género *Manduca* (Sphingidae) en Ecuador y sus implicaciones agroecológicas

Michelle Cañizares-Huilca^{1*}, Diego Guevara¹, Francisco Piñas²

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Ambientales, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

² Centro Cultural Biblioteca Ecuatoriana Aurelio Espinosa Pólit, Quito Ecuador.

*Autor para correspondencia/ corresponding author: lmcanizares@puce.edu.ec

Geographic distribution of *Manduca* moths (Sphingidae) in Ecuador: Agroecological roles and management implications

Resumen

El género *Manduca* (Lepidoptera: Sphingidae) incluye especies de polillas con relevancia ecológica y agrícola, que pueden actuar como polinizadores o como plagas de cultivos. Este estudio tuvo como objetivo analizar su distribución geográfica en Ecuador, utilizando datos provenientes de colecciones científicas, repositorios digitales y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). A través de este enfoque, se identificaron patrones de distribución en las cuatro principales regiones del país (Sierra, Costa, Amazonía e Insular), así como sus asociaciones con cultivos agrícolas y diversos ecosistemas. Los resultados mostraron que la mayor concentración de registros de *Manduca* se encuentra en la región Sierra (170 registros), seguida de la Costa (154 registros), con una presencia particularmente destacada de *Manduca rustica*. Este hallazgo sugiere una posible preferencia por las zonas montañosas y que las especies de *Manduca* podrían tener un papel crucial en la polinización de cultivos en dichas áreas. Además, se registró su implicación como plagas en algunas zonas agrícolas. Los resultados del estudio enfatizan la necesidad de adoptar enfoques agroecológicos que reconozcan los roles duales de estas polillas, buscando un equilibrio entre su conservación como polinizadores valiosos y su control como plagas agrícolas, como se aborda en la discusión.

Palabras clave: polinización, polillas, biodiversidad, patrones de distribución, conservación.

Abstract

The genus *Manduca* (Lepidoptera: Sphingidae) includes species of moths with ecological and agricultural relevance, which can act as pollinators or crop pests. This study aimed to analyze their geographical distribution in Ecuador, using data from scientific collections, digital repositories, and Geographic Information System (GIS) tools. Through this approach, distribution patterns were identified in the four main regions of the country (Sierra, Coast, Amazon, and Islands), as well as their associations with agricultural crops and various ecosystems. The results showed that the highest concentration of *Manduca* records is found in the Sierra region (170 records), followed



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Mateo Dávila-Játiva

Recibido /
Received:
11/06/2025

Aceptado /
Accepted:
10/11/2025

Publicado en línea /
Published online:
05/05/2026



by the Coast (154 records), with a particularly notable presence of *Manduca rustica*. This finding suggests a possible preference for mountainous areas and that *Manduca* species could play a crucial role in crop pollination in these areas. In addition, their involvement as pests in some agricultural areas was recorded. The results of the study emphasize the need to adopt agroecological approaches that recognize the dual roles of these moths, seeking a balance between their conservation as valuable pollinators and their control as agricultural pests, as mentioned in the discussion.

Keywords: pollination, moths, biodiversity, distribution patterns, conservation.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, el sector agropecuario desempeña un papel crucial en la economía, siendo la principal fuente de empleo con una representación significativa del 29.4 % de la población económicamente activa. Desde una perspectiva económica, la agricultura se destaca como una de las actividades principales que contribuyen considerablemente a los ingresos del país [1]. Alrededor del 75 % de los cultivos que son fundamentales para la dieta humana requieren polinización para desarrollar sus frutos. Esta dependencia de los polinizadores, entre los que se encuentran las polillas, es importante para la producción de alrededor de un tercio de los alimentos consumidos, mostrando así su relevancia vital en la cadena alimentaria [2].

El género *Manduca* pertenece a la familia Sphingidae, un grupo diverso de polillas ampliamente distribuido y reconocido por su relevancia ecológica como polinizadores nocturnos y por su impacto en las redes tróficas [3]. Se ha documentado su participación en la polinización de varias especies vegetales como *Tocoyena formosa*, *Inga sessilis* y *Carica papaya* [4]. Este género incluye aproximadamente 70 especies [5], de las cuales 19 han sido registradas en Ecuador [6]. Además, las adaptaciones de los esfíngidos a sus ambientes son notables. Estas adaptaciones incluyen la forma del cuerpo y las alas, que están relacionadas con sus hábitos de vuelo; los grandes ojos compuestos, especialmente conspicuos, que facilitan su vida predominantemente crepuscular; y la probóscide larga, que es una adaptación crucial para alimentarse de plantas con flores de cálices profundos, que se abren al comienzo del período de vuelo de los esfíngidos [7]. En algunas especies, la lengua puede alcanzar longitudes extremas, como en *Neococytius cluentius*, cuya probóscide mide 255 mm [7]. La coloración y las marcas también han evolucionado bajo diversas influencias selectivas, proporcionando camuflaje durante el día y patrones conspicuos en las alas traseras y partes laterales del abdomen, que se ocultan cuando las polillas están en reposo [7].

Los rasgos compartidos por todos los individuos son: una probóscide igual o mayor en longitud que el cuerpo; el paroniquio, un tarso delgado y espinoso que siempre está presente con un único lóbulo en cada lado; y antenas que pueden mostrar variabilidad en su longitud. Asimismo, pueden variar la existencia o dimensiones de las espinas en el antetarso y la presencia del pulvillus [8]. En la Figura 1 se ilustran algunas de las especies de *Manduca* registradas en Ecuador.

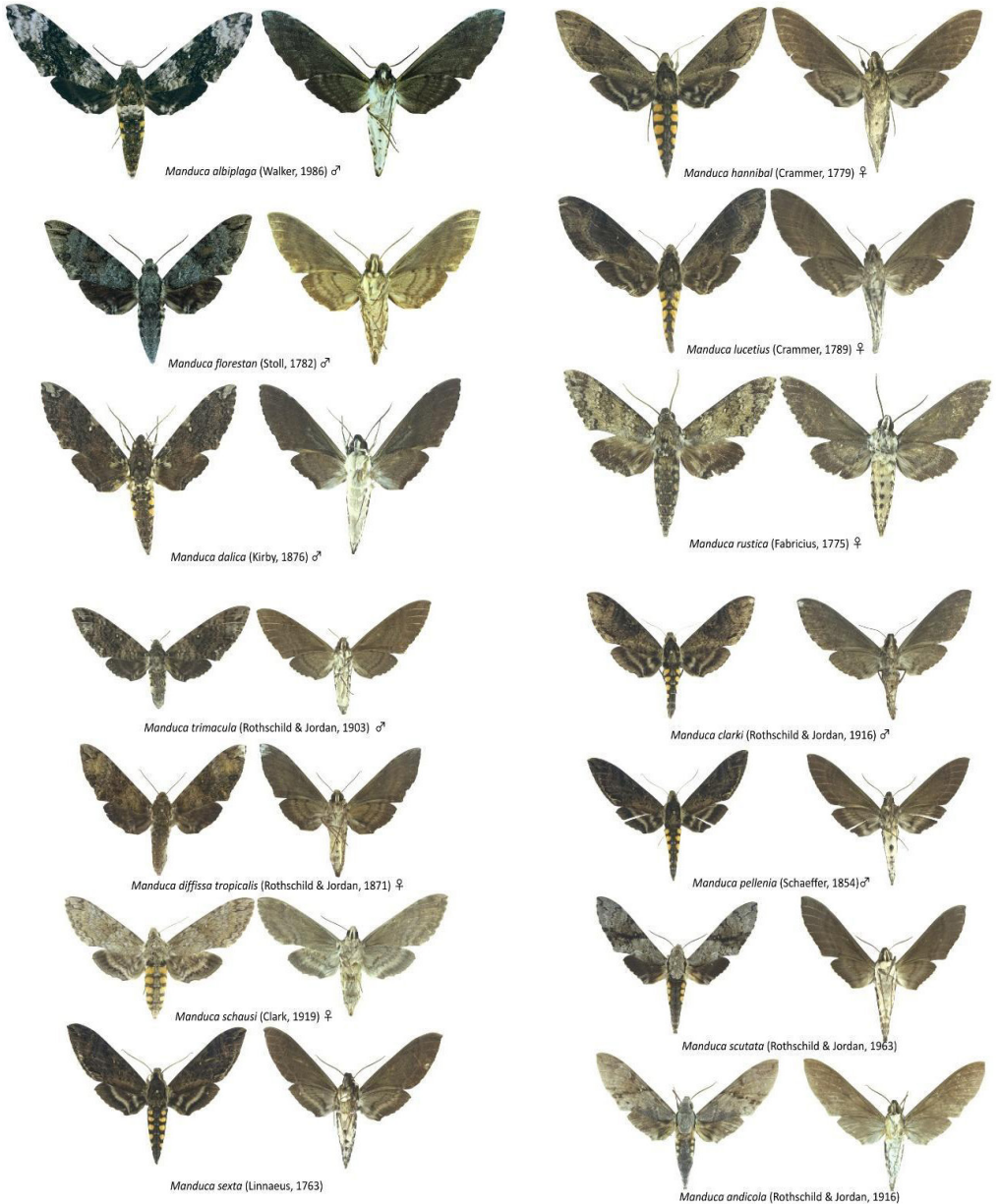


FIGURA 1. Diversidad de especies del género *Manduca* presentes en Ecuador. Fotografías de individuos adultos que ilustran la variabilidad morfológica del grupo.

Las larvas de *Manduca* se distinguen de otros esfingidos por un conjunto de caracteres diagnósticos: presentan un cuerno caudal conspicuo en el último segmento abdominal y franjas oblicuas claras a lo largo de los flancos [5, 6]. En la Figura 2 se ilustran estos caracteres.



FIGURA 2. Larvas de *Manduca sexta* (izquierda) y *Manduca rustica* (derecha). Fotografías de observaciones en iNaturalist. Créditos: David Braun y Artur Tomaszek [9] [10].

En Ecuador, especies como *Manduca sexta* (Fabricius, 1775), *M. rustica* (Fabricius, 1775) y *M. albiplaga* (Walker, 1856) desempeñan roles duales: actúan como plagas agrícolas en cultivos de tabaco (*Nicotiana tabacum*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y cacao (*Theobroma cacao*), pero también son polinizadores clave en sistemas agroforestales [3, 11].

El conocimiento sobre la distribución de *Manduca* en el país es limitado y se restringe a un mapeo preliminar de Sphingidae en ecosistemas según Sierra [12] sin considerar su relación con cultivos agrícolas [6]. Este trabajo busca llenar ese vacío, aportando información agroecológica y espacial que permita comprender mejor los patrones de distribución del género y su interacción potencial con cultivos de relevancia económica. Por tanto, este estudio tuvo como objetivo analizar la distribución espacial del género *Manduca* en el Ecuador continental y las islas Galápagos, e identificar sus asociaciones con ecosistemas naturales y cultivos de importancia económica mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos utilizados en este estudio fueron obtenidos de tres fuentes principales: el Museo de Zoología QCAZ, la plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y observaciones verificadas en grado de investigación a través de la aplicación iNaturalist. En la colección del Museo de Zoología QCAZ se encuentran registrados 520 especímenes de la familia Sphingidae, correspondientes a 72 especies. Para la identificación de las especies se tomó como referencia a D'Ábrera [8]; además, la identificación de los registros fotográficos fueron corroborados con el autor del libro Sphingidae del Ecuador, elaborado en conjunto con dos especialistas de esta familia [6].

En total, se recopilieron 478 registros correspondientes a 16 especies del género *Manduca*. Cabe señalar que, de las 19 especies conocidas para el Ecuador, únicamente se encontraron registros de 16 en las bases de datos analizadas. Cada registro incluyó datos de localización



geográfica, coordenadas de latitud y longitud y fecha de observación, lo que permitió visualizar la distribución de este género en el país.

Para garantizar la calidad y precisión, se realizó un proceso de curación de los datos en *ArcMap*, para lo cual se eliminaron los registros duplicados utilizando la herramienta *Delete Identical*, considerando como criterios las coordenadas y las fechas de observación. Se corrigieron errores geográficos mediante las herramientas *Repair Geometry* y *Select by Location*, con el fin de identificar y ajustar registros que se encontraban fuera de los rangos geográficos esperados para las especies observadas. Adicionalmente, se empleó el *Editor Tool* para realizar ajustes manuales en los casos necesarios. Las coordenadas geográficas fueron validadas mediante el software DIVA-GIS [13], lo que permitió verificar que las ubicaciones coincidieran con límites geográficos válidos para la región de estudio.

Una vez que los datos fueron curados, se procesaron en el software *ArcMap* para realizar análisis espaciales y generar mapas de distribución de las especies. Durante este proceso, se integraron diversas capas geoespaciales, incluyendo la clasificación de vegetación propuesta por Sierra [12]. Además, se utilizaron datos de uso del suelo proporcionados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), lo que permitió identificar las áreas de cultivos presentes en las zonas de estudio.

Los análisis espaciales se centraron en evaluar las asociaciones entre los registros de *Manduca* y los tipos de cultivos presentes en Ecuador, utilizando las categorías de cultivos definidas por el MAGAP. Estos cultivos fueron seleccionados debido a su relevancia económica y su distribución geográfica en las zonas donde se registraron las especies. El análisis permitió identificar posibles relaciones entre la distribución de las especies de *Manduca* y la presencia de estos cultivos en las diferentes regiones del país.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados con estudios previos, como los de Schreiber [7] y Queiroz [3], para identificar patrones consistentes en la distribución de las especies y en la relación con los tipos de cultivos. Esta comparación permitió contextualizar los hallazgos obtenidos y generar nuevos conocimientos sobre la ecología del género *Manduca* en Ecuador.

RESULTADOS

Distribución geográfica de *Manduca* en el Ecuador continental y las islas Galápagos

A partir de 478 registros del género *Manduca* se identificaron los distintos puntos altitudinales de su presencia en el país, que varían entre los 2 y los 2 800 m s. n. m. (Figura 3).

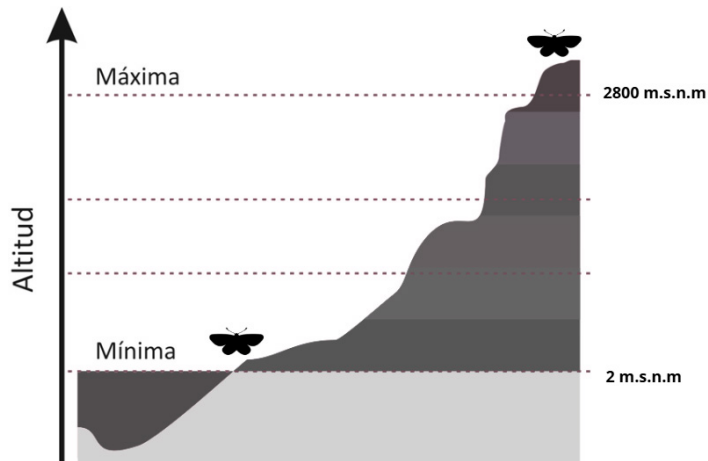


FIGURA 3. Rango altitudinal de registros de *Manduca* en diferentes regiones del país (n = 478).

Las especies del género *Manduca* presentan una distribución amplia a lo largo de las cuatro regiones geográficas del Ecuador (Figura 4). Los registros abarcan casi todas las provincias del país, con excepción de Cañar, Carchi, Los Ríos, Morona Santiago y Santa Elena. Un análisis cuantitativo muestra que la región Sierra concentra el mayor número de registros (n = 170), seguida por la Costa (n = 154), la Amazonía (n = 114) y, en menor proporción, la Insular (n = 40) (Figura 5).

Entre las especies registradas, *Manduca rustica* destaca por su amplia distribución. Está presente en las cuatro regiones, aunque con diferentes frecuencias según la zona (Figura 5).

La presencia de *Manduca* en el territorio ecuatoriano no responde a un patrón aleatorio, sino que parece estar condicionada por factores ambientales específicos, principalmente el tipo de ecosistema, el clima y la altitud. Las especies muestran una clara preferencia por ambientes cálidos y húmedos, característicos de los bosques siempreverdes de la Costa y la Amazonía, lo cual coincide con la alta concentración de registros en estas zonas. Asimismo, la altitud emerge como un factor limitante, ya que la mayoría de los registros se concentran en áreas de baja elevación, lo que sugiere una distribución altitudinal restringida hacia pisos climáticos más cálidos.

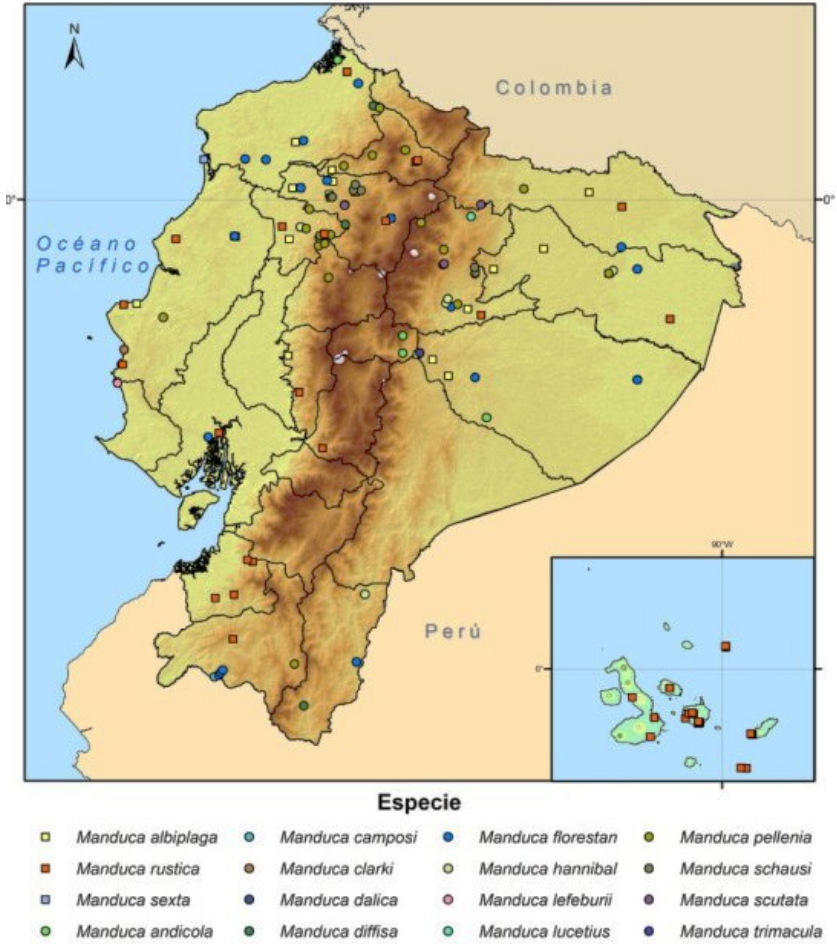


FIGURA 4. Distribución geográfica de dieciséis especies del género *Manduca* en Ecuador continental y las islas Galápagos; cada especie está representada por un punto en el mapa, indicando su presencia en áreas específicas de acuerdo con los registros disponibles.

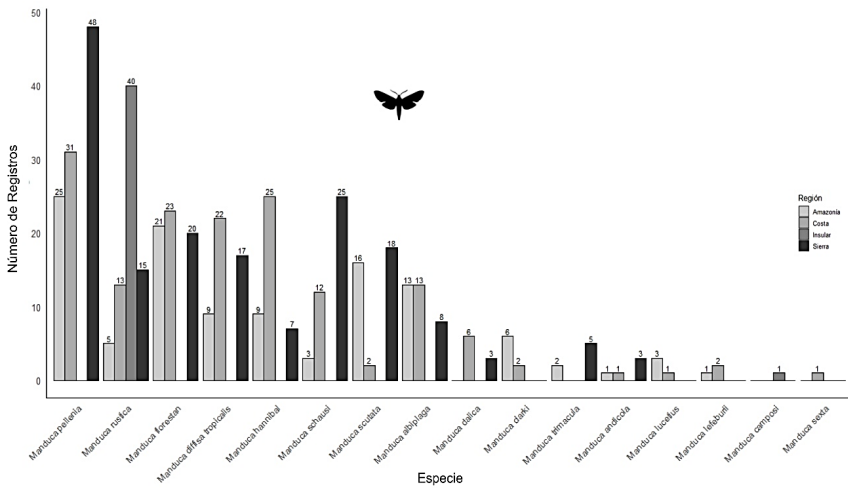


FIGURA 5. Número de registros de especies de *Manduca* (Sphingidae) en cuatro regiones del Ecuador (Amazonía, Costa, Sierra e Insular). Cada barra representa el total de registros de una especie en cada región. Elaboración propia.

Distribución geográfica de *Manduca* de acuerdo con el sistema de clasificación de ecosistemas Sierra (1999)

Se georreferenciaron un total de 478 registros únicos de localidades correspondientes a polillas del género *Manduca*, los cuales fueron distribuidos y analizados en función de los distintos ecosistemas del Ecuador, según la clasificación ecológica propuesta por Sierra [12] (Figura 6). El análisis espacial reveló una marcada afinidad de estas especies con tres ecosistemas específicos: el bosque siempreverde piemontano de la Costa, el bosque siempreverde de tierras bajas de la Amazonía y el bosque seco tropical. Estos ambientes ofrecen condiciones ecológicas clave para el desarrollo de las polillas, incluyendo la disponibilidad de plantas hospedadoras y refugios adecuados para las distintas fases de su ciclo de vida [12].

En particular, el bosque seco tropical mostró una notable superposición espacial entre la presencia de *Manduca* y zonas agrícolas, lo que sugiere posibles interacciones ecológicas entre las matrices naturales y los sistemas productivos.

Dentro del bosque siempreverde piemontano de la Costa se registraron 25 ocurrencias pertenecientes a las especies *M. albiplaga*, *M. diffisa*, *M. florestan*, *M. hannibal*, *M. pellenia*, *M. rustica* y *M. schausi*. Este ecosistema se caracteriza por una vegetación arbórea densa, con alturas superiores a los 30 metros, dominada por especies de las familias Lauraceae, Myricaceae, Meliaceae y Arecaceae. La liana más representativa corresponde a la familia Bignoniaceae, mientras que en el estrato herbáceo predominan Cyathaceae, Araceae y helechos del grupo Polypodiopsida. Su altitud varía entre los 600 y 800 m s. n. m., lo que sugiere que estas condiciones altitudinales y estructurales podrían ser determinantes para la presencia de las especies del género [12].



Por su parte, en el bosque siempreverde de tierras bajas de la Amazonía se contabilizaron 17 registros de las especies *M. albiplaga*, *M. andicola*, *M. florestan*, *M. hannibal*, *M. pellenia* y *M. rustica*. Estas localidades se ubicaron en áreas planas adyacentes a los ríos Zamora y Nangaritza, entre los 600 y 900 m s. n. m. En estas zonas, la transformación del paisaje ha sido significativa: gran parte de la vegetación original ha sido reemplazada por cultivos y pastizales, subsistiendo únicamente árboles aislados en potreros y chacras como remanentes de la cobertura nativa. La flora remanente está compuesta principalmente por especies de las familias Combretaceae, Euphorbiaceae, Meliaceae, Lecythidaceae, Moraceae y Rutaceae [12].

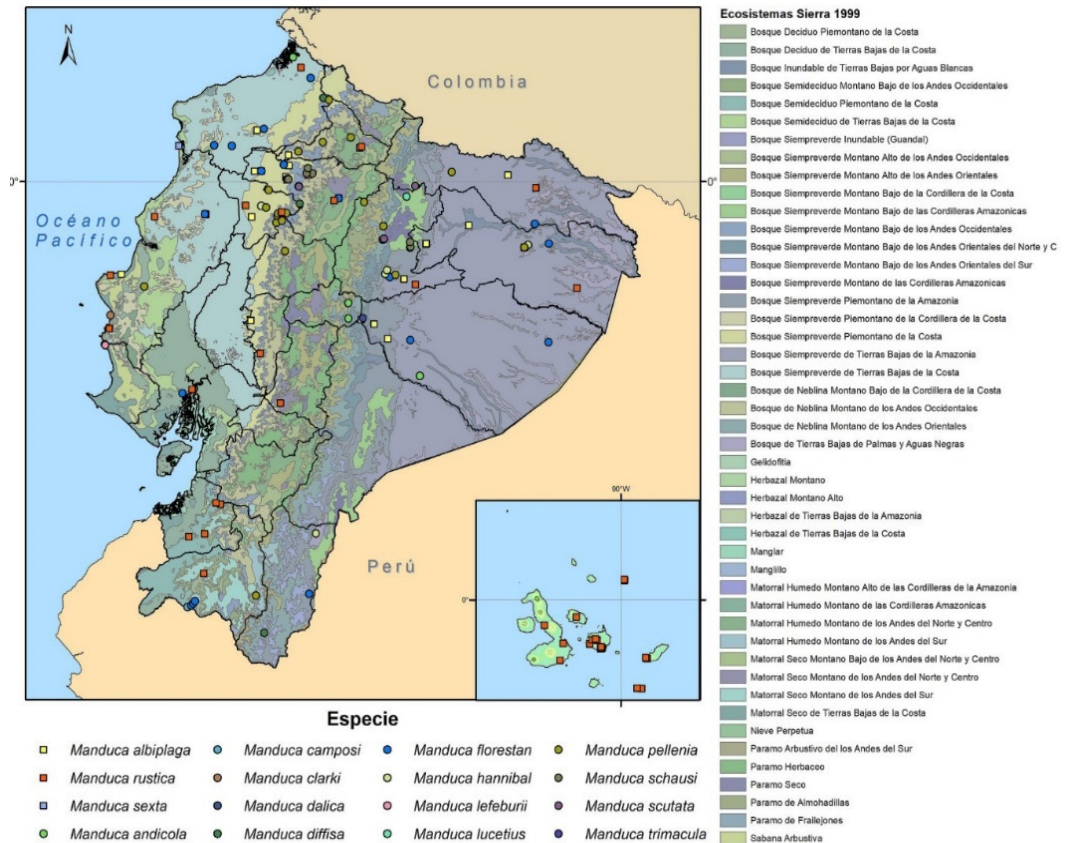


FIGURA 6. Distribución del género *Manduca* en ecosistemas según Sierra [12]. Distribución geográfica de dieciséis especies del género *Manduca* en Ecuador. Cada especie está representada por un punto en el mapa, indicando su presencia en los ecosistemas.



Algunas especies de *Manduca* se encuentran en frutales, oleaginosas, cereales e industriales, lo que evidencia la importancia de comprender la interacción entre estas polillas y los sistemas agrícolas (Tabla 1). En particular, la presencia de *M. albiplaga*, *M. pellenia* y *M. rustica* se asocia con frutales, oleaginosas y cultivos industriales como cacao, palma africana y café.

TABLA 1. Asociación entre las polillas del género *Manduca* y diversos cultivos agrícolas en diferentes provincias del Ecuador. Elaboración propia

Nombre de la especie	Provincia	Tipo de Cultivo	Nombre de Cultivo
<i>Manduca albiplaga</i>	Pichincha	Frutales	Frutales
<i>Manduca florestan</i>	Pichincha	Oleaginosas	Palma africana
<i>Manduca pellenia</i>	Pichincha	Frutales	Cacao
<i>Manduca pellenia</i>	Napo	Frutales	Cacao
<i>Manduca florestan</i>	Esmeraldas	Oleaginosas	Palma africana
<i>Manduca pellenia</i>	Imbabura	Cereales	Maíz amarillo duro
<i>Manduca camposi</i>	Loja	Cereales	Arroz
<i>Manduca pellenia</i>	Loja	Frutales	Café
<i>Manduca rustica</i>	Santo Domingo de los Tsáchilas	Oleaginosas	Palma africana

DISCUSIÓN

El género *Manduca* en Ecuador presenta una distribución predominante en la región Sierra, seguida por la Costa, la Amazonía y la región Insular. Esta distribución podría estar determinada por la disponibilidad de plantas hospederas y la notable capacidad de vuelo de estas polillas, que les permite ocupar un amplio rango altitudinal (2–2 800 m s. n. m.). La familia Sphingidae, a la que pertenece *Manduca*, se caracteriza precisamente por su alta movilidad y capacidad para colonizar diversas zonas, incluyendo islas oceánicas como Galápagos y Hawái [7, 14]. En el presente estudio, basado en 478 registros, se describieron los rangos altitudinales y las regiones de presencia del género en el territorio ecuatoriano. Resultados similares han sido reportados en otros contextos. Por ejemplo, Han [15] observó en Corea que las especies de Sphingidae prefieren áreas más frescas y secas, predominando en bosques y zonas montañosas a gran altura.

Sin embargo, es importante señalar que la distribución observada en Ecuador puede estar influida por la desigualdad en los esfuerzos de muestreo entre regiones, asociada a factores como la accesibilidad, las preferencias de colecta y la disponibilidad de recursos. Asimismo, el uso de bases de datos generales implica considerar posibles sesgos derivados de la intensidad y los períodos de muestreo, así como de la representación desigual de los hábitats, los cuales pueden generar patrones que reflejan más el esfuerzo de observación o colecta que la verdadera presencia o ausencia de las especies.

La biodiversidad ecuatoriana se distingue por su extraordinaria riqueza, derivada de su posición geográfica en el neotrópico, su compleja topografía y la diversidad de



zonas climáticas [12]. El sistema de clasificación ecológica de Sierra [12], que integra criterios geomorfológicos, climáticos, de vegetación y de uso del suelo, proporciona un marco adecuado para analizar los patrones de distribución del género *Manduca* en el país, ya que permite relacionar la presencia de las especies con unidades ecológicas claramente diferenciadas.

Los bosques de tierras bajas de la Amazonía ecuatoriana y peruana comparten condiciones ambientales y florísticas similares, con climas cálidos y húmedos (más de 2 500 mm de precipitación anual, temperaturas entre 24–28 °C y alta humedad). Estos ecosistemas, dominados por bosques latifoliados siempreverdes, albergan una gran riqueza de especies vegetales como caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro (*Cedrela odorata*) y ceiba (*Ceiba pentandra*), además de una abundante presencia de epifitas y plantas endémicas [12, 16, 17]. En este tipo de bosque, Ignatov [18] reportó registros de *M. albiplaga*, *M. hannibal*, *M. pellenia* y *M. rustica*, especies también encontradas en nuestro estudio. Estos resultados refuerzan la idea de que dichas especies son comunes en ecosistemas amazónicos y que su distribución incluye el territorio ecuatoriano (Figura 2).

Otro ecosistema con alta representatividad de *Manduca* fue el bosque siempreverde de tierras bajas de la Costa, donde se registraron 13 individuos de *M. albiplaga*, *M. andicola*, *M. florestan* y *M. rustica*. Este ecosistema, que se extiende hasta los 300 m s. n. m., está dominado por especies arbóreas de las familias Myristicaceae, Arecaceae, Moraceae, Fabaceae y Meliaceae, y presenta abundancia de epifitas, trepadoras y un denso estrato herbáceo compuesto principalmente por Araceae y Polydiodiophyta [12].

Las especies de *Manduca* desempeñan un papel ecológico relevante en los ecosistemas ecuatorianos al influir en la dinámica poblacional de diversas familias botánicas. Su dieta generalista, característica de la familia Sphingidae, les permite adaptarse a distintos hábitats y aprovechar una amplia variedad de plantas hospederas [11]. Esta plasticidad alimentaria explica su amplia distribución geográfica y su capacidad de colonizar ecosistemas contrastantes, desde las tierras bajas tropicales hasta zonas montañosas templadas.

Ecuador presenta un patrón complejo de distribución de esfíngidos, determinado por sus condiciones geográficas y climáticas variables. Las dos cordilleras andinas (4 000–5 000 m s. n. m.) y la cordillera costera (300–600 m s. n. m.) actúan tanto como barreras como corredores biológicos, modulando la dispersión de las especies [6]. La corriente fría de Humboldt, que modifica el clima tropical húmedo del Pacífico, favorece la formación de bosques tropicales de tierras bajas, mientras que hacia el sur se observa una transición hacia ecosistemas semiáridos con vegetación espinosa [7]. A nivel global, se han documentado más de 1 600 especies de esfíngidos, de las cuales aproximadamente el 28 % se encuentran en el Neotrópico [19]. En Ecuador se han registrado al menos 112 especies en la región oriental, 52 de las cuales también se encuentran en la occidental [6, 7], y en Colombia se reportan alrededor de 190 especies [19]. Aunque los Andes funcionan como barrera biogeográfica, permiten cierta conectividad y dispersión de especies entre Ecuador y Colombia [6, 7].

En cultivos agroforestales en el Ecuador, *M. albiplaga* y *M. pellenia* se registraron asociadas a frutales como cacao y café. En Brasil, se ha reportado una relación similar, donde



especies del género *Manduca* visitan cultivos de *Hancornia speciosa* (Apocynaceae) y *Carica papaya* [4], lo que evidencia su potencial función como polinizadores de frutales [9]. *Manduca florestan*, *M. pellenia*, *M. rustica* y *M. camposi* han sido registradas en sistemas agroforestales ecuatorianos, asociados a cultivos como palma africana, maíz y arroz. En contraste, *M. diffusa* ha sido documentada en Brasil sobre *Schubertia grandiflora*, una especie ornamental propia de la sabana neotropical. Asimismo, *M. pellenia* ha sido reportada como visitante floral de *Coffea arabica* en Ecuador y de *Tocoyena formosa* (Rubiaceae) en Brasil [4], donde se la describe exclusivamente como polinizador y no como plaga. En conjunto, estas observaciones evidencian la versatilidad ecológica del género *Manduca*, así como su potencial doble rol como herbívoro o polinizador, dependiendo del contexto ecológico y de la especie vegetal asociada.

Explorar en mayor detalle el ciclo de vida de *M. albiplaga*, *M. pellenia* y *M. rustica* en sistemas agroforestales ecuatorianos resulta fundamental para comprender su papel funcional. El estudio de sus hábitos alimenticios, preferencias de hábitat y comportamiento reproductivo permitiría evaluar su importancia como polinizadores potenciales en dichos sistemas.

CONCLUSIONES

Las especies del género *Manduca* presentan una distribución amplia en el territorio ecuatoriano, con una notable concentración en la región Sierra, lo que sugiere una posible afinidad ecológica por ecosistemas montañosos. Esta preferencia puede estar relacionada con la disponibilidad de cultivos y plantas hospedadoras presentes en estas zonas.

El análisis espacial realizado mediante herramientas SIG permitió identificar la presencia de *Manduca* tanto en ecosistemas naturales como en zonas agrícolas, donde cumplen roles duales como polinizadores y plagas. Esta doble función destaca la importancia de enfoques integrados en el manejo agrícola.

Reconocer el valor ecológico de *Manduca* como polinizadores, sin descuidar su potencial impacto como plagas, es fundamental para diseñar estrategias agroecológicas más equilibradas. La integración de herramientas tecnológicas y de información geográfica representa una oportunidad clave para orientar acciones de conservación y manejo sostenible en paisajes agrícolas diversos.

El fortalecimiento de sistemas de monitoreo y la disponibilidad pública de bases de datos entomológicas contribuirán al desarrollo de investigaciones más precisas, al diseño de prácticas agrícolas resilientes y a la valoración del rol de insectos nativos en la producción alimentaria.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al PhD. Santiago Burneo por su apoyo en el manejo del software utilizado en esta investigación.



Expresamos nuestro agradecimiento al Museo de Zoología QCAZ por permitir la revisión de los especímenes, y a la Biblioteca Aurelio Espinosa Pólit por facilitarnos el acceso a su colección para la consulta de especímenes.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Todos los autores contribuyeron en las distintas etapas de elaboración del presente artículo.

Michelle Cañizares: redacción del manuscrito, elaboración de mapas y figuras. Diego Guevara: concepción de la idea, redacción del manuscrito, obtención de datos y revisión del contenido. Francisco Piñas: validación e identificación de especímenes y gestión del préstamo de material biológico.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los/las autor(es/as) utilizaron GEMINI con el propósito de mejorar la calidad de redacción del trabajo. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos correspondientes están disponibles previa solicitud al autor.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con los contenidos de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Chunchu Juca, L., Uriguen Aguirre, P., & Apolo Vivanco, N. (2021). Ecuador: Análisis económico del desarrollo del sector agropecuario e industrial en el periodo 2000–2018. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 8(1), 8–17. <https://doi.org/10.26423/rctu.v8i1.547>
- [2] Arizmendi, C. (2009). La crisis de los polinizadores. *Biodiversitas*, 85, 1–5. <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Coro-2009.pdf>
- [3] Queiroz, J. A., Diniz, U. M., Vázquez, D. P., Quirino, Z. M., Santos, F. A. R., Mello, M. A. R., & Machado, I. C. (2020). Bats and hawkmoths form mixed modules with flowering plants in a nocturnal interaction network. *Biotropica*, 53(2), 596–607. <https://doi.org/10.1111/btp.12902>
- [4] De Ávila, R. S., Jr., Oliveira, R., Pinto, C. E., Amorim, F. W., & Schlindwein, C. (2012). Relações entre esfingídeos (Lepidoptera, Sphingidae) e flores no Brasil: Panorama e perspectivas de uso de polinizadores. En V. L. Imperatriz-Fonseca (Ed.), *Polinizadores no Brasil* (pp. 143–152). Edusp.
- [5] Kitching, I. J. (2018). *Sphingidae taxonomic inventory: Creating a taxonomic e-science*. <http://sphingidae.myspecies.info/>
- [6] Guevara C., D., Iorio, A., Piñas R., F., & Onore, G. (2002). *Mariposas del Ecuador (continental y Galápagos): Butterflies & moths of Ecuador*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- [7] Schreiber, H. (1978). *Dispersal centres of Sphingidae (Lepidoptera) in the Neotropical region*. Springer Science & Business Media.
- [8] D'Abreu, B. (1986). *Sphingidae mundi: Hawk moths of the world: based on a checklist by Alan Hayes and the collection he curated in the British Museum (Natural History)*. E.W. Classey Ltd.
- [9] Braun, D. (2025). *Manduca sexta* [Fotografía]. iNaturalist. <https://ecuador.inaturalist.org/observations/313868096>
- [10] Tomaszek, A. (2025). *Manduca rustica* [Fotografía]. iNaturalist. <https://ecuador.inaturalist.org/observations/307915750>
- [11] Bassett, L. G., Burkholder, J. F., & Forstner, M. R. (2022). *Forestiera* (Oleaceae) is a host plant of *Manduca rustica* (Sphingidae). *Journal of the Lepidopterists' Society*, 76(3), 216–218. <https://doi.org/10.18473/lepi.76i3.a9>
- [12] Sierra, R. (Ed.). (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia. <https://ecociencia.org/propuesta-preliminar-de-un-sistema-de-clasificacion-de-vegetacion-para-el-ecuador-continental/>
- [13] Hijmans, R. J., Guarino, L., Bussink, C., Mathur, P., Cruz, M., Barrentes, I., & Rojas, E. (2004). *DIVA-GIS* (Software).
- [14] Cary, M. M. (1951). Distribution of Sphingidae (Lepidoptera: Heterocera) in the Antillean-Caribbean region. *Transactions of the American Entomological Society*, 77(2), 63–129. <https://www.jstor.org/stable/25077627>
- [15] Han, Y.-G., Cho, Y., Kwon, O., Kang, Y.-K., Park, Y.-J., Kim, Y., Choi, M.-J., & Nam, S.-H. (2015). A study of the spatio-temporal distribution changes of the Korean hawk moth (Lepidoptera: Sphingidae). *Journal of Ecology and Environment*, 38(1), 25–38. <https://doi.org/10.5141/ecoenv.2015.003>
- [16] Álvarez-Montalván, C. E., Manrique-León, S., Fonseca, M. V., Cardozo-Soarez, J., Callo-Ccorcca, J., Bravo-Cámara, P., Castañeda-Tinco, I., & Álvarez-Orellana, J. (2021). Composición florística, estructura y diversidad arbórea de un bosque amazónico en Perú. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 73–82. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.009>
- [17] Meggers, B. J. (1999). *Ecología y biogeografía de la Amazonía*. Abya-Yala. https://digitalrepository.unm.edu/abya_yala/131
- [18] Ignatov, I., Janovec, J., Centeno, P., Tobler, M., Grados, J., Lamas, G., & Kitching, I. (2011). Patterns of richness, composition, and distribution of sphingid moths along an elevational gradient in the Andes–Amazon region of southeastern Peru. *Annals of the Entomological Society of America*, 104(1), 68–76. <https://doi.org/10.1603/AN09083>
- [19] Prada Lara, L., Botero, L., Quijano, A., & Correa-Carmona, Y. (2025). *Hawkmoths (Sphingidae) of Bogotá city*. Caja de Colores.

Microfisuramiento de las varillas de refuerzo empleadas en la construcción de viviendas informales: Caso de estudio Riobamba

Evelyn Melisa Cabrera Alvarez^{1*}, Teresa del Pilar Sáez Paguay¹, Luisa Paulina Viera Arroba¹

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador.

*Autor para correspondencia/ corresponding author: emcabrera@uce.edu.ec

Microcracking of reinforcing bars used in informal housing construction: Riobamba case study

Resumen

Este trabajo investiga la relación entre el método de doblado de las varillas de refuerzo y la iniciación de microfisuras en aceros de refuerzo empleados en viviendas informales de la ciudad de Riobamba, Ecuador. Se compararon dos técnicas de doblado: el método tradicional y el realizado conforme a la Norma NTE INEN 2167. A partir de encuestas en campo se identificaron los diámetros de varilla y las prácticas de doblado más utilizadas. Se analizaron 20 muestras de varillas de 10 mm y 12 mm de diámetro, incluyendo tramos rectos y varillas dobladas a 180°, mediante ensayos metalográficos y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados evidencian la ausencia de microfisuras en las muestras sin doblar y en aquellas dobladas con máquina semiautomática, bajo condiciones normativas, mientras que el doblado tradicional genera microfisuras localizadas en la zona interior del doblado, asociadas a concentraciones de esfuerzo en los resaltes longitudinales. El análisis de la longitud acumulada de microfisuras indica que el diámetro de la varilla tiene una influencia significativa en el nivel de microfisuración bajo las condiciones estudiadas. Los hallazgos resaltan la importancia del cumplimiento de los procedimientos normativos de doblado para preservar la ductilidad del acero de refuerzo y mejorar el desempeño de las estructuras de hormigón armado frente a cargas cíclicas en contextos de construcción informal.

Palabras clave: calidad, hormigón, metalografía, microfisuración, microscopía.

Abstract

This study investigates the relationship between the method used to bend reinforcing bars and the initiation of microcracks in reinforcing steel used in informal housing in the city of Riobamba, Ecuador. Two bending techniques were compared: the traditional method and the method carried out in accordance with Standard NTE INEN 2167. Field surveys were used to identify the most commonly used rebar diameters and bending practices. Twenty samples of 10 mm and 12 mm diameter rebars were analyzed, including straight sections and rebars bent at 180°, using metallographic tests and scanning electron microscopy (SEM). The results show the absence of microcracks in the unbent samples and in those bent with a semi-automatic machine under standard conditions, while traditional bending generates microcracks located in the inner area of the bend, associated with stress concentrations in the longitudinal ridges. Analysis



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
21/04/2025

Aceptado /
Accepted:
24/12/2025

Publicado en línea /
Published online:
15/05/2026



of the cumulative length of microcracks indicates that the diameter of the bar has a significant influence on the level of microcracking under the conditions studied. The findings highlight the importance of complying with standard bending procedures to preserve the ductility of reinforcing steel and improve the performance of reinforced concrete structures under cyclic loads in informal construction contexts.

Keywords: quality, concrete, metallography, microcracking, microscopy.

INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica, la informalidad en las construcciones es una práctica habitual en sectores medios y populares, siendo más evidente en las proximidades y periferias de los centros urbanos [1]. En Ecuador, es común observar viviendas que se ejecutan sin supervisión profesional, lo que resulta en un uso inadecuado de técnicas constructivas que aumentan la vulnerabilidad de las edificaciones frente a cargas sísmicas [2]. Entre 2012 y 2022, el país experimentó más de 70 000 sismos con magnitudes superiores a 2, y más de 8 474 viviendas resultaron afectadas por esta causa [3].

Diversos estudios de vulnerabilidad estructural han evidenciado la problemática relacionada con la calidad en el manejo y disposición de las varillas de refuerzo en edificaciones de hormigón armado. Por ejemplo, doblar varillas o estirarlas excesivamente pueden formar puntos débiles [4]. Esto ocurre cuando no se cumple con el diámetro interior mínimo de doblado establecido en el capítulo 25 del Código ACI 318-19, es decir, cuando el diámetro del mandril central alrededor del cual se apoya la varilla es inferior al mínimo exigido, situación que ocurre con el empleo de la estribadera tradicional y el tubo que sirve de palanca para doblar la varilla [5].

La varilla de construcción es una sólida barra redonda fabricada para utilizarse en estructuras de hormigón armado, con resaltes que generan una adherencia mecánica con el hormigón [6]. Sin embargo, estos resaltes salientes, transversales, con un ángulo de inclinación comprendido entre 45° y 90°, constituyen concentradores de esfuerzos o tensiones que podrían ser sitios potenciales de iniciación de fractura [7], por lo que deben considerarse ciertas condiciones durante el proceso de doblado.

El acero de refuerzo puede sufrir mecanismos de falla relacionados con la fatiga de bajo ciclo (LCF) durante los terremotos, cuando es sometido a grandes ciclos de deformación inelástica en tensión y compresión. Este estrés cíclico puede provocar la aparición de microfisuras en los elementos estructurales [8], y con el tiempo, conducir a la fractura de las varillas de refuerzo. Las microfisuras corresponden a la iniciación del daño en un elemento, no detectables a simple vista, y se presentan cuando se ha superado localmente la capacidad resistente del material [9].

Durante el doblado, la varilla se somete a compresión en su parte interior y a tracción en su parte exterior [10]. Este proceso se realiza en frío y no sólo afecta a la dureza del material, sino también al límite elástico, resistencia a la tracción y ductilidad [11, 12, 13, 14].



Para evitar deficiencias estructurales, todo proceso constructivo debe cumplir con las exigencias requeridas por la Norma Ecuatoriana de Construcción, en particular en lo referente al doblado de varillas. Según la Norma NTE INEN 2167, este procedimiento debe realizarse sobre el resalte longitudinal, garantizando un contacto permanente de la varilla alrededor de un mandril de apoyo. No obstante, se evidencia una divergencia entre las especificaciones técnicas y las condiciones reales del proceso de construcción [2]. Esta discrepancia es más evidente en las construcciones informales, donde la ausencia de planos y la falta de supervisión técnica de un profesional conducen al uso de métodos empíricos para el figurado (doblado) de las varillas. Esta práctica es especialmente común en zonas con escaso control por parte de las autoridades competentes, como en las periferias de las ciudades.

En el caso de Riobamba, las zonas de expansión urbana se encuentran delimitadas por los polígonos de interés social, en donde existe un crecimiento desorganizado y sin planificación, ocasionado por asentamientos humanos mayoritariamente irregulares, derivados del tráfico de tierras y la especulación [15].

En el presente estudio, se realizó un levantamiento de datos en los sectores periféricos de Riobamba, utilizando como referencia la proyección estimada de viviendas a construir al segundo trimestre del 2023 en la ciudad de Riobamba, la cual, según información del diario *Primicias*, fue de 315 viviendas [16]. La proliferación de construcciones informales en la ciudad de Riobamba constituye una realidad preocupante, ya que, según datos proporcionados por la Unidad de Avalúos y Catastros, más del 40 % de las construcciones reciben multas o sanciones por no contar con el respectivo permiso de construcción [17]. En este contexto, se tomó dicho porcentaje aplicado a las 315 viviendas, estimándose que aproximadamente 126 viviendas informales fueron construidas en Riobamba durante ese año. A partir de este resultado, y considerando un porcentaje representativo del 52.7 % de edificaciones que emplean hormigón en la región Sierra [18], se estimó una población mínima de 67 viviendas informales construidas con hormigón en los sectores periféricos de la ciudad.

Dado que esta población resultó manejable en términos de tamaño, se la utilizó como base para determinar el tamaño de la muestra. Durante el trabajo de campo, se realizaron encuestas *in situ* a encargados de 69 construcciones de viviendas informales que cumplieran con las condiciones requeridas para el estudio.

Además, para los ensayos metalográficos y de microscopía electrónica de barrido (SEM), el análisis se centró en las varillas de 10 mm y 12 mm, ya que estos diámetros fueron los más representativos según las encuestas realizadas.

En total, se realizaron 20 ensayos metalográficos, distribuidos equitativamente entre varillas de 10 mm y 12 mm, con 10 ensayos por cada diámetro. Estos incluyeron cuatro repeticiones por cada técnica de doblado (tradicional y a máquina), así como dos muestras patrón sin doblado, lo que asegura una representatividad adecuada en la variabilidad del proceso de doblado y la generación de microfisuras. La elección de este número de ensayos, muestreo no probabilístico, estuvo influenciada por las limitaciones económicas relacionadas con el costo de cada uno, obteniendo una adecuada cobertura sin exceder el presupuesto disponible.



El estudio determina la influencia del método de doblado de las varillas de refuerzo utilizadas en la construcción de viviendas informales en los sectores periféricos de Riobamba sobre la formación de microfisuras y, por ende, sobre la calidad del refuerzo estructural. Asimismo, evalúa el efecto del diámetro de las varillas en el nivel de microfisuración observado.

Finalmente, se reconoce como una brecha de investigación la limitada disponibilidad de equipos sofisticados de microscopía en Ecuador, así como la escasa bibliografía sobre estudios relacionados con la calidad de los materiales de construcción locales, lo que refuerza la pertinencia del presente estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La delimitación georreferenciada de los polígonos de interés social de Riobamba fue proporcionada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, a través de la Dirección de Gestión de Ordenamiento Territorial. Esta información permitió identificar los sectores periféricos de la ciudad considerados en el estudio, los cuales se ilustran en la Figura 1.

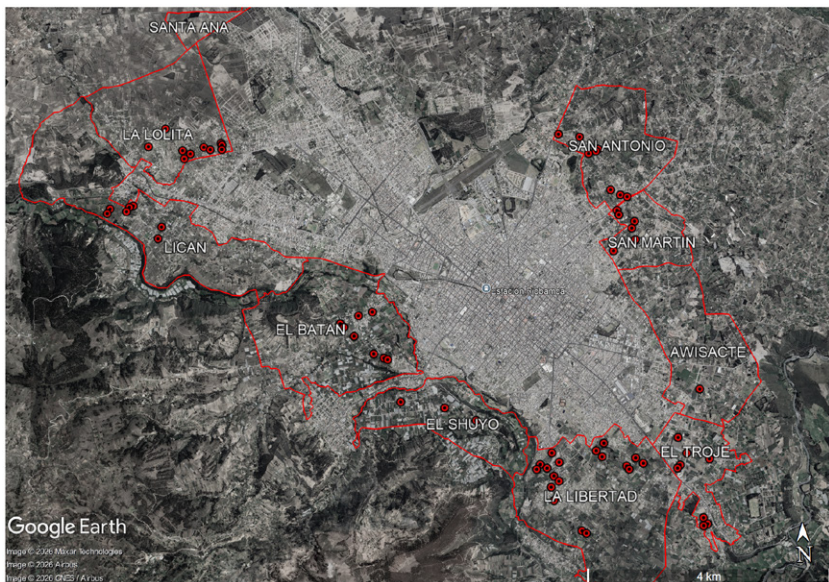


Figura 1. Polígonos de interés social de la ciudad de Riobamba, Chimborazo. Elaboración propia a partir de imágenes de Google Earth (2022). [19]

Debido a que no se dispone de un registro oficial preciso sobre la cantidad de viviendas informales construidas anualmente en esta zona, se utilizó como referencia el 40 % de construcciones que reciben multas o sanciones por no contar con permiso de



construcción en el año 2023 [17]. Con base en esta información, se definió una muestra de 69 encuestas en campo, distribuidas en los barrios que conforman los Polígonos de Interés Social de la ciudad.

Las encuestas fueron validadas mediante las técnicas de “prueba piloto” [20] y “validez de contenido” [21]. Para la “prueba piloto”, se aplicó la encuesta inicial en diez viviendas informales en proceso de construcción ubicadas en barrios periféricos del sur de Quito. La “validez de contenido”, por su parte, se llevó a cabo mediante la revisión de la encuesta por parte de nueve expertos, entre ingenieros civiles y arquitectos de la Universidad Nacional de Chimborazo, el Colegio de Ingenieros Civiles y el Municipio de Riobamba.

Las encuestas finales fueron aplicadas a los encargados de las obras, quienes no contaban con formación profesional en arquitectura o ingeniería civil. El objetivo principal de estas encuestas fue determinar el diámetro de las varillas de construcción y las técnicas de doblado más utilizadas en la práctica constructiva.

Con base en los resultados de las encuestas, se seleccionaron varillas de acero de 10 mm y 12 mm de diámetro para el análisis experimental. Las muestras fueron adquiridas en una distribuidora nacional, asegurando que cada diámetro de probeta proviniera de una única varilla continua. El acero adquirido corresponde a varillas de refuerzo con un límite de fluencia de $F_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ según la normativa nacional vigente.

Para el estudio metalográfico, se realizaron ensayos de acuerdo con la Norma ASTM E3, complementados con observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), conforme a la Norma E1508. Se ejecutaron diez ensayos para cada diámetro de varilla (10 mm y 12 mm), distribuidos en cuatro ensayos por cada técnica de doblado (doblado tradicional y doblado a máquina), además de dos ensayos correspondientes a muestras patrón sin doblado por cada diámetro. En total se realizaron 20 ensayos.

Las probetas fueron cortadas a una longitud de 50 cm, por conveniencia en el proceso de doblado. El análisis se centró exclusivamente en dobleces de 180° , dado que este ángulo corresponde al establecido en la Norma NTE INEN 2167 para las pruebas de doblado de varillas de refuerzo y representa la condición más crítica desde el punto de vista mecánico.

El doblado tradicional se realizó utilizando bancos de doblado de madera empotrados en el piso, equipados con estribaderas conformadas por barras de acero soldadas a una placa metálica, cuya separación determina las dimensiones del estribo, el recubrimiento y el diámetro de la varilla (ver Figuras 2 y 3).



Figura 2. Estribadera utilizada en el doblado tradicional de varillas de acero de 10 mm.



Figura 3. Estribadera utilizada en el doblado tradicional de varillas de acero de 12 mm.

El proceso de doblado tradicional consistió en el corte manual de las varillas mediante una sierra, seguido del doblado realizado por el operario, personal no calificado, utilizando la estribadera y un tubo metálico como palanca. La fuerza aplicada dependió exclusivamente del esfuerzo del operario, por lo que no fue posible controlar ni parametrizar su magnitud.

Todas las probetas sometidas al doblado por el método tradicional fueron realizadas por el mismo operario, sin brindarle instrucciones adicionales, con el fin de reproducir su práctica habitual en obra (Figura 4). En consecuencia, el doblado no se efectuó sobre el resalte longitudinal de la varilla, tal como lo establece la Norma NTE INEN 2167, situación que se ilustra en la Figura 5.



Figura 4. Práctica de doblado tradicional de varillas de acero.

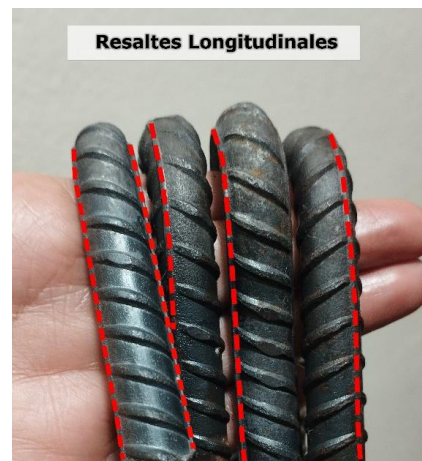


Figura 5. Resaltes longitudinales en varillas dobladas mediante el método tradicional.

Para realizar el doblado de varillas conforme a los parámetros establecidos por la Norma NTE INEN 2167 y el Código ACI 318-19, se empleó una dobladora semiautomática de acero de la marca OFMER (Figura 6). Se seleccionaron los mandriles adecuados para alcanzar los diámetros mínimos especificados en el Código ACI 318-19. En cumplimiento de la Norma NTE INEN 2167, las varillas se alinearon de forma que el doblado se realizara de manera libre, es decir, sobre el resalte longitudinal (Figura 7).

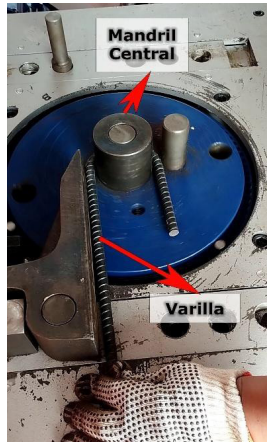


Figura 6. Dobladora semiautomática utilizada para el doblado de varillas conforme a la normativa vigente.



Figura 7. Varillas dobladas mediante dobladora semiautomática, mostrando la alineación del doblez sobre el resalte longitudinal.

Las probetas obtenidas fueron enviadas a un laboratorio certificado para su preparación, siguiendo las directrices de la Norma ASTM E3-11: "Práctica estándar para la preparación de muestras metalográficas".

En las Figuras 8 y 9 se observa el proceso de pulido y las muestras preparadas. Las muestras se prepararon sin ataque químico, ya que el estudio no incluye la determinación de la composición del material de las varillas.



Figura 8. Proceso de pulido de las muestras metalográficas.



Figura 9. Muestras metalográficas preparadas conforme a la Norma ASTM E3-11, sin ataque químico.

Los ensayos realizados a las muestras patrón, aquellas tomadas de los tramos rectos de las varillas, tuvieron como único propósito comparar sus resultados con los obtenidos de las muestras dobladas, tanto mediante el método tradicional como con la máquina eléctrica.

En los ensayos metalográficos las microfisuras se observaron con un aumento de 100x, ya que su tamaño es suficientemente grande como para no ser visibles con un aumento de 500x.



Las muestras preparadas para metalografía fueron empleadas también para las observaciones en microscopio de barrido electrónico (SEM). Se utilizó el microscopio JEOL JSM-IT100 (Figura 10).

Para la observación de las muestras en el microscopio electrónico de barrido, es necesario verificar que estas estén secas y sean conductoras. Aunque las muestras de varillas son conductoras, la resina sobre la que fueron preparadas no lo es. Por lo tanto, fue necesario recubrirlas con un material conductor, mediante un proceso conocido como *sputtering* o pulverización catódica, para formar una película delgada de oro, como se muestra en la Figura 11.



Figura 10. Muestra colocada en la cámara de vacío del microscopio electrónico de barrido (SEM).



Figura 11. Muestra metalográfica recubierta con oro para observación SEM, preparadas según la Norma ASTM E3-11.

No se observaron microfisuras en las muestras dobladas con la máquina eléctrica. Para evaluar si el diámetro de la varilla ejerce un efecto sobre el nivel de microfisuración en las varillas del método tradicional, se construyó una base de datos con las longitudes de las microfisuras obtenidas a través del ensayo metalográfico. Dado que el interés radica en evaluar el tamaño total de las microfisuras, se trabajó con la longitud acumulada, que corresponde a la suma de las longitudes individuales de las microfisuras por milímetro cuadrado de cada muestra, varillas de 10 mm y varillas de 12 mm.

Se comenzó por obtener los parámetros estadísticos descriptivos básicos, seguido del análisis mediante la interpretación de la gráfica de intervalos y de diferencia de medias. Para sustentar que existe una relación entre el nivel de microfisuración y el diámetro de la varilla, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, debido a que la cantidad de datos de cada muestra es pequeña para asumir una distribución normal.

RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran los barrios periféricos de Riobamba, junto con el número de encuestas realizadas en cada uno de ellos.

Del total de encuestas aplicadas, se encontró que en 11 construcciones informales se afirmó tener un profesional a cargo, sin embargo, este no se encontraba en la obra en el



momento de la visita. En 58 construcciones, el mando recaía en un maestro mayor, y en un caso, en el propietario de la vivienda. De acuerdo con la información de los encuestados, 46 construcciones contaban con planos arquitectónicos, mientras que solo 19 tenían planos estructurales. Asimismo, 12 de los encuestados afirmaron conocer lo que indica la normativa vigente en Ecuador acerca del doblado de las varillas, mientras que 57 lo desconocían.

Se halló que, en 20 de las obras visitadas, se empleó máquina eléctrica para figurar varillas (Figura 6), mientras que en 49 se empleó el doblado tradicional, que consiste en el uso de bancos con clavos guía, trampas y tubos (Figuras 2, 3 y 4).

Para la conformación de columnas, vigas y losas, del sector de estudio, se utilizan principalmente varillas de 12 mm de diámetro, mientras que para los estribos se emplea principalmente la de 10 mm.

Las Figuras 12 y 13 corresponden a muestras de varillas dobladas mediante el método tradicional. Se observa una diferencia en la curvatura alcanzada respecto de la que debería obtenerse de acuerdo con los requisitos establecidos por la Norma NTE INEN 2167 y el Código ACI 318-19. Se ha encontrado un porcentaje de incumplimiento del diámetro mínimo del 46 % para las varillas de 10 mm y del 67 % en las varillas de 12 mm.

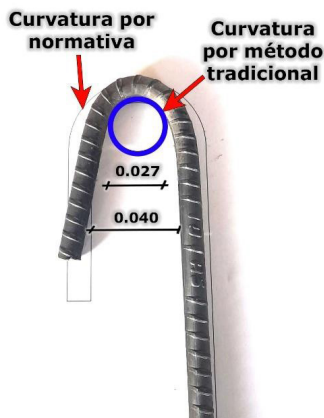


Figura 12. Comparación entre la curvatura obtenida mediante el método tradicional en y la curvatura mínima requerida por normativa en varillas de acero de 10 mm de diámetro.

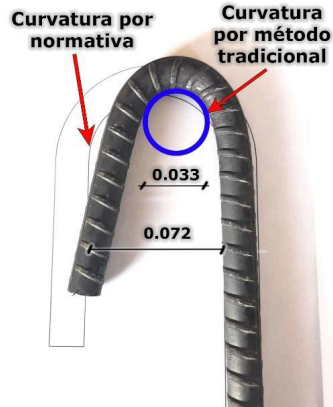


Figura 13. Comparación entre la curvatura obtenida mediante el método tradicional en y la curvatura mínima requerida por normativa en varillas de acero de 12 mm de diámetro.

Esta discrepancia se debe a que las barras que componen la estribera impiden que el doblez se desarrolle. En otras palabras, el diámetro del mandril central, alrededor del cual se realiza el doblado, es inferior al mínimo requerido, incumpliendo lo establecido en la Tabla 25.3.2 del código ACI 318-19, que especifica que el diámetro mínimo de doblado para varillas de la No. 10 a la No. 16 debe ser cuatro veces el diámetro de la varilla. Asimismo, no se cumple con lo señalado en la Tabla 25.3.1, que establece que, para varillas No. 10 a la No. 25, el diámetro mínimo de doblado debe ser seis veces el diámetro de la varilla, como requisito para el desarrollo de las barras corrugadas en tracción.

Por el contrario, las Figuras 14 y 15 corresponden a muestras de varillas dobladas mediante máquina semiautomática (Figura 6), en las que se evidencia el cumplimiento del diámetro de curvatura establecido por la Norma NTE INEN 2167 y el Código ACI 318-19. Este método garantiza una aplicación continua y uniforme de la fuerza durante el proceso de doblado, permitiendo un libre movimiento de la probeta en los puntos de contacto con el equipo, específicamente en el mandril central y los apoyos.

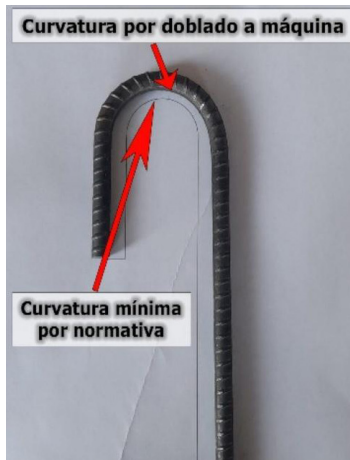


Figura 14. Varillas de 10 mm doblada mediante máquina semiautomática.



Figura 15. Varillas de 12 mm doblada mediante máquina semiautomática.

Metalografía de las muestras de tramos rectos y de las muestras dobladas mediante una máquina semiautomática

Las Figuras 16 y 17 muestran fotografías obtenidas mediante metalografía de las muestras patrón (tramos rectos sin doblar) de las varillas de 10 mm y 12 mm, respectivamente. Por otro lado, las Figuras 18 y 19 corresponden a fotografías de las muestras dobladas a máquina, también de 10 mm y 12 mm respectivamente. En las fotografías obtenidas de los ensayos metalográficos (Figuras 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23), la zona amarilla corresponde a la varilla, mientras que la parte más oscura representa la resina que rodea la muestra.



Figura 16. Micrografía metalográfica de muestra patrón (tramo recto), varilla de 10 mm.



Figura 17. Micrografía metalográfica de muestra patrón (tramo recto), varilla de 12 mm.



Figura 18. Micrografía metalográfica de varilla de 10 mm doblada a máquina.



Figura 19. Micrografía metalográfica de varilla de 12 mm doblada a máquina.

No se observaron microfisuras en ninguna de las muestras, ya sean tramos sin doblar o muestras dobladas con máquina, tanto para la varilla de 10 mm como para la de 12 mm, lo que demuestra que, al figurar la varilla con el empleo de mandriles adecuados en la máquina semiautomática, esta mantiene sus condiciones iniciales evitando sobreesfuerzos.

Metalografía en las muestras dobladas mediante el método tradicional

En todas las muestras analizadas, dobladas con el método tradicional, se observaron microfisuras exclusivamente en la parte interior del doblado, es decir, en la zona comprimida, como se ilustra en la Figura 20.

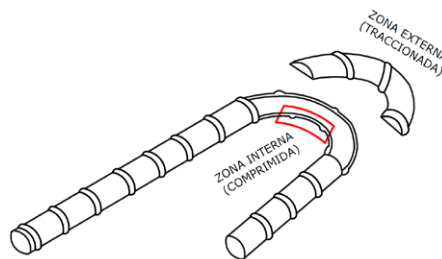


Figura 20. Microfisuras observadas en la zona interior del doblado en varillas dobladas mediante el método tradicional.

Dado que el interés radica en evaluar el tamaño total de las microfisuras, se midió cada una de ellas (representadas mediante las líneas blancas), asignándoles un número de identificación.

Posteriormente, se sumaron las longitudes individuales de las microfisuras para obtener la longitud acumulada en un milímetro cuadrado en cada muestra (Tabla 1). Cabe señalar que no se incluyen todas las imágenes obtenidas, sino solo una de cada caso. En este sentido, la Figura 21 corresponde a la muestra de 10 mm doblada con el método tradicional, mientras que la Figura 22 corresponde a la muestra de 12 mm doblada con el mismo método.

Las muestras dobladas con el método tradicional, tanto de 10 mm como de 12 mm, presentan un número y tamaño de microfisuras distintos, como se observa en la Tabla 1. Por

lo tanto, las Figuras 21 y 22 no reflejan el comportamiento de todas las muestras en cuanto al tamaño y número de microfisuras, sino que representan casos seleccionados para su análisis.

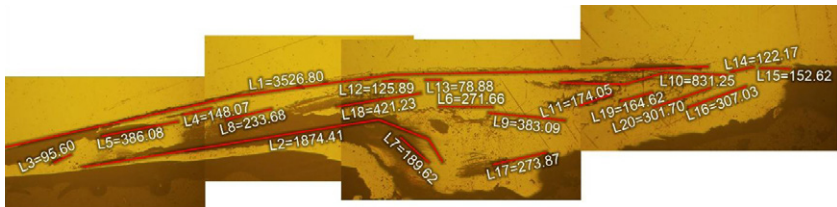


Figura 21. Microfisuras en varilla de 10 mm doblada mediante el método tradicional. Muestra T10A [µm].



Figura 22. Microfisuras en varilla de 12 mm doblada mediante el método tradicional. Muestra T12A [µm].

En la Figura 21 se observan áreas con espacios amplios, los cuales indican una deformación plástica del material, evidenciando el desplazamiento del mismo. A continuación, en la Figura 23 se muestra un ejemplo de este fenómeno.



Figura 23. Deformación plástica en la zona interior del doblez de una varilla doblada mediante el método tradicional.

De igual manera, las variaciones en la superficie del material que se observan en las Figuras 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, obtenidas de los ensayos metalográficos, que no presentan morfología puntiaguda, corresponden a rebabas producto del rolado de la varilla durante su fabricación.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la suma de las longitudes individuales de las microfisuras de cada muestra doblada mediante la técnica tradicional. En las varillas de



10 mm, la muestra T10A presenta la mayor longitud acumulada de microfisuras, seguida de las muestras T10C y T10B, mientras que la menor microfisuración corresponde a la muestra T10D. En el caso de las varillas de 12 mm, la mayor microfisuración se observa en la muestra T12A, seguida de las muestras T12C y T12B, siendo la muestra T12D la que presenta la menor longitud de microfisuras.

Este comportamiento se debe a que existen varios factores que influyen en el proceso de doblado, como la fuerza aplicada y la ubicación del resalte longitudinal, la cual no fue la misma en todas las muestras (Figura 4).

TABLA 1. Longitud acumulada de fisuras obtenida a partir del análisis metalográfico en muestras de varillas dobladas mediante el método tradicional.

Tramo	Técnica de doblado	Diámetro de la varilla ϕ (mm)	Muestra	Longitud total de microfisuras (μm)
Doblado	Tradicional	10	T10A	10062.32
			T10B	4700.93
			T10C	5358.49
			T10D	2172.40
		12	T12A	1645.39
			T12B	957.65
			T12C	1191.2
			T12D	494.89

Los parámetros estadísticos descriptivos básicos de los datos se presentan en la Tabla 2. A partir de estos resultados, se observa una variabilidad moderada en las longitudes totales de las microfisuras para los diámetros analizados, con un coeficiente de variación cercano al 50 %, lo que indica una dispersión considerable de los valores en comparación con el valor promedio. Esta variabilidad se refleja también en la Figura 24, donde las observaciones no siguen una tendencia uniforme.

Se evidencia que la variabilidad de los datos es mayor en las varillas de 10 mm de diámetro en comparación con las varillas de 12 mm. Este comportamiento sugiere que las mediciones de las microfisuras en las varillas de 10 mm son más dispersas o heterogéneas, lo que puede interpretarse como una mayor sensibilidad en esta muestra a los factores que afectan el proceso de doblado, como la fuerza aplicada y la ubicación del resalte longitudinal. En las varillas de 12 mm, los valores tienden a estar más cerca de la media.

Este análisis pone en evidencia que, aunque existe una tendencia general en las mediciones, la influencia de estos factores puede alterar considerablemente los resultados, lo que refuerza la importancia de controlar y minimizar las variables involucradas en el proceso de doblado para reducir la dispersión de los resultados y obtener un comportamiento más uniforme.



Se destaca que la media de las longitudes totales de microfisuras en las varillas de 10 mm dobladas mediante el método tradicional es aproximadamente cinco veces mayor que la correspondiente a las varillas de 12 mm dobladas con el mismo método, con lo que se puede afirmar que las microfisuras obtenidas en las varillas de 10 mm dobladas por el método tradicional son mayores que las obtenidas en las varillas de 12 mm. Sin embargo, para descartar que este resultado se deba al azar, se debe aplicar un método de significancia estadística.

Dado que el tamaño muestral para cada diámetro es reducido y no se puede asumir una distribución normal, se empleó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney para determinar si este resultado es estadísticamente significativo. Con un nivel de confianza de 95 %, se obtuvo un valor $p = 0.03$, inferior al valor crítico de 0.05, lo que indica que existe evidencia estadística para afirmar que el diámetro de la varilla sí tiene un efecto en el nivel de microfisuración generado en las varillas dobladas con el método tradicional, evidenciándose que a menor diámetro corresponde un mayor nivel de microfisuras.

TABLA 2. Parámetros estadísticos descriptivos básicos de las longitudes totales de microfisuras en varillas dobladas mediante el método tradicional.

Variable	Diámetro de la varilla (mm)	N (# de muestras)	Media	Coefficiente de variación	Suma	Min.	Mediana	Máx.
Longitud total (μm)	10	4	5573.54	59.08	22294.14	2172.40	5029.71	10062.32
	12	4	1072.28	44.70	4289.13	494.89	1074.43	1645.39

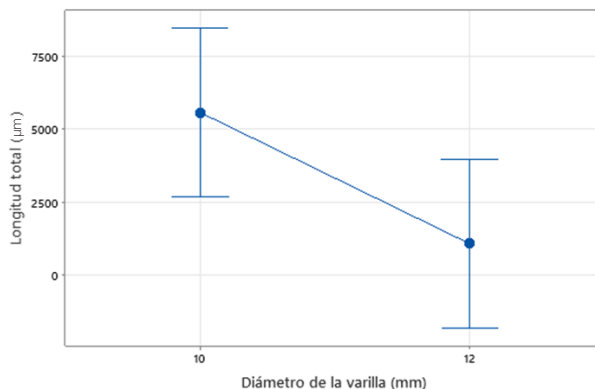
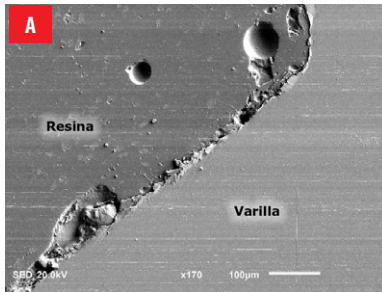


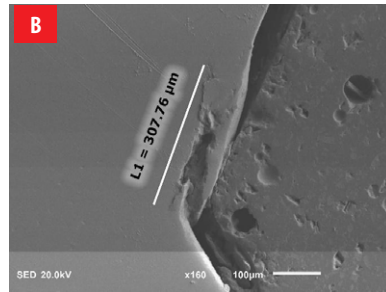
Figura 24. Gráficos de intervalos de las longitudes totales de microfisuras en varillas de 10 mm y 12 mm dobladas mediante el método tradicional.

Las observaciones a través del microscopio electrónico de barrido (SEM), confirmaron lo obtenido mediante ensayos metalográficos, pues, al realizar un recorrido por el borde externo e interno de las muestras, se observaron microfisuras en los resaltes de las varillas

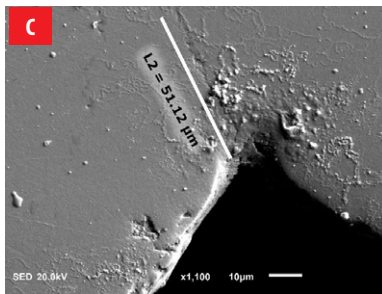
dobladas mediante el método tradicional, precisamente en la zona interior del doblé (Figura 25). En contraste, la superficie de las muestras que fueron dobladas utilizando la máquina eléctrica no presentó daño.



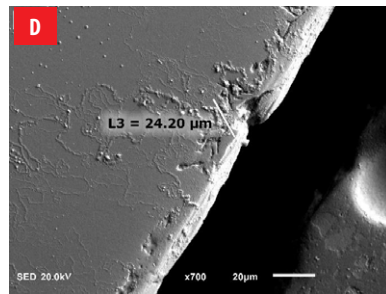
A. Superficie de una muestra de varilla doblada con máquina eléctrica, sin evidencia de daño superficial. Aumento: 170x.



B. Microfisura de 307.76 µm formada en la zona interna del doblé, correspondiente al concentrador de esfuerzo donde se inicia el corrugado. Aumento: 160x.



C. Iniciación de la microfisura en el concentrador de esfuerzos; se observa la dirección de propagación hacia el centro de la varilla. Aumento: 1100x.



D. Rebabas superficiales producto del rolado y la oxidación, que se desprenden durante el doblado, además de una microfisura de 24.20 µm. Aumento: 700x.

Figura 25. Micrografías obtenidas mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) que muestra la iniciación y propagación de microfisuras en muestras de varillas dobladas. Las imágenes fueron obtenidas con un voltaje de haz de 20.0 kV y una distancia de trabajo (WD) entre 17 y 18 mm. Los aumentos utilizados se indican en cada micrografía.

DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos metalográficos realizados a las muestras tomadas de los tramos rectos de las varillas (Figuras 16 y 17) coinciden con lo esperado, dado que estas zonas de la varilla no fueron sometidas a esfuerzo alguno. Esto se refleja en la ausencia de microfisuras, lo que confirma que la integridad del material no se vio comprometida en estas secciones.

En cuanto a los resultados de los ensayos metalográficos realizados en las muestras dobladas mediante la utilización de una máquina de doblado semiautomática, mostradas



en las Figuras 18 y 19, se observa que, al realizar el doblado siguiendo las recomendaciones de la Norma NTE INEN 2167 y el acápite 25.3 del Código ACI 318-19, no se evidencia microfisuración en la zona doblada. Esto sugiere que el proceso de doblado cumple con los requisitos establecidos para mantener la integridad del material, garantizando así la resistencia y durabilidad de las varillas en las zonas sometidas a esfuerzo.

Además, estos resultados demuestran que, cuando la velocidad de doblado es constante y se cumple con el diámetro mínimo de curvatura, no se generan sobre esfuerzos, lo que previene la aparición de microfisuras en el proceso de doblado.

En las muestras obtenidas de las varillas dobladas mediante el método tradicional, se observaron microfisuras únicamente en la parte interior del doblez (zona comprimida). En la parte externa del doblez, no se observaron microfisuras (Figura 20). Las microfisuras se originan en el resalte, donde las inclusiones actúan como puntos de activación para la microfisuración.

Durante el doblado tradicional, el resalte longitudinal quedó ubicado en una posición desfavorable respecto al eje neutro de la curvatura, esto provoca que, al momento de aplicar la curvatura, las deformaciones no se distribuyan uniformemente a lo largo de la sección de la varilla. En la zona del resalte, la curvatura impone deformaciones más elevadas, debido a que el resalte forma una protuberancia que actúa como un escalón geométrico, en el cual se concentran esfuerzos. Además, el resalte provoca un leve desplazamiento local del eje neutro y aumenta la rigidez de la zona, lo que eleva la magnitud de los esfuerzos internos. En conjunto, estas condiciones facilitan la iniciación de microfisuras que luego se propagan siguiendo las inclusiones presentes en el material [22].

Con el microscopio electrónico de barrido (SEM) se confirmó la tendencia observada en los resultados obtenidos mediante la metalografía. No obstante, no fue posible identificar exactamente las mismas microfisuras, debido a limitaciones inherentes al principio de funcionamiento de cada tipo de microscopio, al tratamiento adicional aplicado a las muestras para su análisis por SEM (*sputtering*) y al tiempo transcurrido entre la preparación de las muestras y su observación. Estos factores pueden favorecer el inicio de procesos de corrosión superficial, lo que dificulta la identificación y comparación directa de las microfisuras observadas.

Una vez determinado que el doblado de las varillas de refuerzo mediante el método tradicional produce un daño inicial en el material, manifestado en la generación de microfisuras, resulta fundamental analizar el impacto que estas pueden tener en el desempeño mecánico de las varillas. La presencia de microfisuras puede degradar sus propiedades mecánicas y aumentar la susceptibilidad a fracturas frágiles cuando las varillas son sometidas a cargas externas durante la vida útil de las estructuras [12, 13, 14, 23, 24].

En este contexto, resulta fundamental considerar el fenómeno de la fatiga, un proceso de deterioro que evoluciona con el tiempo y que ocurre en elementos sometidos a ciclos repetitivos de tensión, incluso por debajo del límite elástico. Bajo estas condiciones, una grieta comienza a formarse y a crecer progresivamente. Las grietas suelen originarse en defectos del material, ya sean internos o causados por factores externos. Estos defectos pueden ser resultado de cambios abruptos en la geometría, como en áreas



con concentración de tensiones, o en las zonas más vulnerables del material, que en este caso corresponden a las microfisuras originadas por el doblado. Cuando la grieta alcanza un tamaño crítico, se produce el fallo del componente estructural [23].

Durante un evento sísmico, este mecanismo de fatiga adquiere especial relevancia debido a que las sollicitaciones impuestas al acero de refuerzo corresponden a un régimen de fatiga de bajo número de ciclos, caracterizado por cargas cíclicas alternantes de tracción y compresión con amplitudes elevadas. En estas condiciones, las microfisuras preexistentes actúan como concentradores de tensiones, favoreciendo su apertura y cierre en cada ciclo sísmico.

Este proceso genera una acumulación progresiva de daño, ya que las deformaciones locales alrededor de las microfisuras pueden incrementarse, aún cuando las tensiones globales no alcancen el límite último del material. Con el aumento de la demanda inelástica, estas microfisuras pueden propagarse gradualmente, crecer y alcanzar tamaños críticos, reduciendo la ductilidad del acero de refuerzo y aumentando la probabilidad de fallas frágiles durante o después de un evento sísmico [12, 13, 14, 25].

Diversos estudios realizados en países con una alta prevalencia de prácticas de construcción informal han reportado comportamientos concordantes con los observados en el presente trabajo. Investigaciones desarrolladas en distintas regiones de América Latina, Asia y África señalan que el doblado manual o no normativo de varillas de refuerzo, sin un control adecuado del radio de curvatura ni de la velocidad de doblado, conduce a la aparición de microfisuras localizadas en la zona interior del doblez, asociadas a concentraciones de esfuerzo en los resaltos y a defectos microestructurales preexistentes [26, 27].

De igual manera, estos estudios indican que dichas microfisuras pueden constituir puntos de inicio para procesos de degradación acelerada del acero bajo cargas cíclicas de bajo número de ciclos, típicas de eventos sísmicos, favoreciendo la reducción de la ductilidad y el desarrollo de mecanismos de falla frágil en el refuerzo [28, 29, 30]. En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con la evidencia reportada a nivel internacional, reforzando la importancia de adoptar procedimientos de doblado controlados y acordes con la normativa técnica vigente, especialmente en contextos donde predominan prácticas constructivas informales. Asimismo, una mala calidad en el proceso de doblado puede sobrecargar el acero, lo que provoca que pierda sus propiedades y se vuelva más frágil. Esta condición, combinada con prácticas de construcción inadecuadas, puede dar lugar a la aparición de grietas transversales en la barra, afectando negativamente las características de resistencia del material [24].

El presente estudio no incluye ensayos estructurales ni simulaciones sísmicas en estructuras completas. Por esta razón, no se cuantificó el impacto del uso de varillas dobladas tradicionalmente en la resistencia sísmica de estructuras existentes. No obstante, los hallazgos confirman la relevancia de cumplir con las normas de doblado para reducir la vulnerabilidad de los elementos estructurales frente a cargas cíclicas o sísmicas

La relevancia de los resultados obtenidos en el presente estudio para el diseño sismorresistente radica en que el desempeño sísmico de las estructuras de hormigón



armado depende en gran medida de la ductilidad y de la capacidad de disipación de energía del acero de refuerzo, especialmente en las zonas críticas donde se espera la formación de rótulas plásticas, como ganchos, anclajes y regiones de confinamiento. En estas zonas, las varillas suelen ser dobladas y están sometidas a elevadas deformaciones cíclicas durante eventos sísmicos.

La presencia de microfisuras inducidas durante el proceso de doblado puede reducir la capacidad del acero para desarrollar deformaciones inelásticas estables, afectando negativamente los mecanismos de disipación de energía previstos en el diseño sismorresistente. En este sentido, los resultados microestructurales presentados evidencian que un proceso de doblado no controlado puede introducir daño inicial en el refuerzo, lo cual resulta relevante para el cumplimiento de los supuestos de ductilidad y comportamiento inelástico implícitos en los códigos de diseño sísmico.

CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra que, al realizar el figurado de las varillas utilizando una técnica que garantiza un doblez libre con aplicación continua y uniforme de fuerza, en conformidad con la Norma NTE INEN 2167 y el apartado 25.3 del Código ACI 318-19, logrado mediante el uso de una máquina eléctrica semiautomática, no se generan microfisuras en las zonas de doblado. En cambio, al utilizar el método tradicional de estribera fijada sobre bancos de madera y tubos, si se observan microfisuras.

Los datos obtenidos de los ensayos realizados indican que el diámetro de la varilla influye en el nivel de microfisuración generado al doblar las varillas mediante el método tradicional, siendo mayor en las varillas de 10 mm en comparación con las de 12 mm. Sin embargo, a partir de la revisión documental, se encontró que la longitud de la grieta inicial aumentó con el aumento del diámetro de la barra, lo cual contrasta con los hallazgos de esta investigación [24].

Debido al alcance del trabajo realizado y al tamaño de las muestras analizadas, se debe aclarar que esta última afirmación es aplicable a este caso de estudio, con el fin de evitar una sobrestimación de la magnitud de los hallazgos y no generalizar los resultados.

Es importante destacar que las conclusiones de este estudio se aplican estrictamente a varillas de 10 mm y 12 mm sometidas a dobleces de 180°, que corresponden a las condiciones evaluadas experimentalmente. Por lo tanto, los resultados no deben extrapolarse de manera directa a varillas de otros diámetros, a otros ángulos de curvatura ni a configuraciones de figurado diferentes.

Desde el punto de vista práctico, estos hallazgos subrayan la necesidad de reforzar las actividades de inspección en obra, especialmente en estructuras donde se emplean varillas dobladas mediante métodos tradicionales que puedan inducir microfisuración. Asimismo, los resultados sugieren que, en intervenciones de mejoramiento o reforzamiento estructural, debe considerarse la posibilidad de que existan zonas debilitadas en los dobleces, lo que puede requerir medidas de compensación o sustitución. Finalmente, el estudio evidencia la importancia de capacitar a los trabajadores



informales y cuadrillas de obra en el uso de técnicas adecuadas de doblado y en el cumplimiento de los radios mínimos de curvatura, con el fin de reducir la aparición de microfisuras y mejorar el desempeño estructural de las edificaciones.

RECOMENDACIONES

Se recomienda extender el estudio a otras ciudades del país, con tamaño de muestras mayores, así como a obras de mayor escala, con el objetivo de obtener mayor diversidad de datos.

Asimismo es importante socializar los resultados obtenidos con los actores del sector constructivo, especialmente en el ámbito de la construcción informal, a fin de promover la adopción de técnicas de doblado que cumplan con la normativa vigente y contribuyan a mejorar la seguridad estructural.

Como recomendación para obras de construcción informal, se sugiere implementar controles no destructivos basados en verificaciones geométricas del proceso de doblado. En particular, se recomienda verificar el diámetro mínimo del mandril, la separación entre la estribadera y la palanca de doblado, y asegurar que la varilla se doble sobre su resalte longitudinal, conforme a la Norma NTE INEN 2167. Estas medidas contribuyen significativamente a reducir el riesgo de microfisuramiento sin necesidad de ensayos especializados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Evelyn Cabrera: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, redacción, preparación del borrador original, visualización.

Teresa Sáez: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, redacción, preparación del borrador original, visualización.

Luisa Viera: conceptualización, validación, redacción, revisión y edición, visualización, supervisión, administración del proyecto.

Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, no se utilizó ninguna tecnología de inteligencia artificial generativa ni herramientas de asistencia automatizadas en la redacción, análisis de datos o generación de figuras. El manuscrito fue elaborado, revisado y editado íntegramente por las autoras, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido y la versión final del texto publicado.



DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación se encuentran disponibles en el repositorio institucional de la Universidad Central del Ecuador, en acceso abierto, y pueden ser consultados en el siguiente enlace permanente: <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/38860>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores reportan no tener conflictos de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Vergara, F., Fuster, X., Rojas, I., Hidalgo, R., Rincón, S., Álvarez, J., Voltaire, P., Meseguer, O. y Lizana, F. (2022). Vivienda informal y las organizaciones territoriales en América Latina. *Revista de geografía Norte Grande*, 81, 5–14. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022022000100005>
- [2] Torres-Medina, C. C. (2019). *Importancia de una adecuada supervisión técnica sobre el acero de refuerzo durante la ejecución de construcciones de edificaciones* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio de la Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/24349>
- [3] Menéndez, T. (22 de enero de 2026). *70 000 sismos han sacudido a Ecuador en los últimos 10 años*. Primicias. <https://web.archive.org/web/20260209164359/https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/sismos-ecuador-ultimos-anos-instituto-geofisico/>
- [4] Murty, C. V. R., Brzew, S., Faison, H., Comartin, C. D., & Irfanoglu, A. (2006). *En riesgo: El Desempeño Sísmico de los Edificios de Marcos de Concreto Reforzado Rellenos con Paredes de Mampostería* (Traducción al español de J. Gutiérrez & A. González, Publicación número WHE-2006-03). Earthquake Engineering Research Institute. <https://web.archive.org/web/20260209164742/https://www.yumpu.com/es/document/view/30338375/en-riesgo-world-housing-encyclopedia>
- [5] Medina Cruz, R., & Blanco Blasco, A. (2022). *Manual de construcción para maestros de obra*. Aceros Arequipa. <https://web.archive.org/web/20260209165131/https://www.acerosarequipa.com/manuales/manual-de-construccion-para-maestros-de-obra>
- [6] Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2017). *Varillas corrugadas y lisas de acero al carbono laminadas en caliente, soldables, microaleadas o termotratadas, para hormigón armado. Requisitos*. (NTE INEN 2167:2017, tercera revisión). INEN.
- [7] Arana, J., y González, J. (2002). *Mecánica de fractura*. Servicio editorial de la Universidad del País Vasco.
- [8] Loporca, G., Cuevas, A., Pampanin, S., & Kral, M. V. (2018). Monotonic and low-cycle fatigue properties of earthquake-damaged New Zealand steel reinforcing bars. The experience after the Christchurch 2010/2011 earthquakes. *Procedia Structural Integrity*, 11, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.026>
- [9] Narayanan, A., & Subramaniam, K. V. L. (2017). Damage assessment in concrete structures using piezoelectric based sensors. *Revista ALCONPAT*, 7(1). <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.173>
- [10] Molina León, E. R., & Rubio Tomalácelio, A. (2012). *Análisis de funcionamiento, operación y mantenimiento e implementación de una dobladora de tubo para el centro de producción y servicios de la universidad técnica de Cotopaxi*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1347>
- [11] Jiménez Arenas, J. M. (2016). *Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un acero*. [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio de la Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/items/f1e49563-ff07-41eb-9943-8b0fb63c904b>
- [12] Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [13] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2001). *Metal Fatigue in Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [14] Halford, G. R., Manson, S.S. (2006). *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.fdsfm.9781627083447>
- [15] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Riobamba. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Riobamba 2020-2023 (PDyOT)*. Tomo II. GADM Riobamba. <https://es.scribd.com/document/556324305/PDOT-Tomo-II>
- [16] González, P. (2023, 5 de noviembre). *Construcción de viviendas cae en Quito y Guayaquil, pero sube en Samborondón*. Primicias. https://web.archive.org/web/20260209212736/https://www.primicias.ec/noticias/economia/construccion-viviendas-quito-guayaquil-samborondon/?utm_source
- [17] Ríos, D. (2023). *Las regulaciones urbanísticas del GAD Cantonal de Riobamba y las construcciones informales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12049>



- [18] Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). *Estadísticas de edificaciones (ESED) 2023: Permisos de construcción*. https://web.archive.org/web/20260210125028/https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2023/anual/2.2023_ESED_Principales_resultados.pdf
- [19] Google Earth. (2022). [Ciudad de Riobamba] Recuperado febrero 12, 2026 de https://earth.google.com/web/@-1.66180546,-78.65523421,2783.27497671a,15350.0071028d,35y,3.91901695h,1.4754464t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASgOI_____ARAA?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419&authuser=0
- [20] Villavicencio-Caparó, E., Ruiz-García, V., & Cabrera-Duffaut, A. (2016). Validación de cuestionarios. *Odontología Activa Revista Científica*, 1(3), 71-76. <https://oactiva.ucacue.edu.ec/index.php/oactiva/article/view/200/339>
- [21] Sánchez, A. B., Navarro, C. C., Garay, N. Z., & Mata, J. S. (2022). La validación por juicio de expertos como estrategia para medir la confiabilidad de un instrumento. *TECTZAPIC: Revista Académico-Científica*, 8(1), 9-18. <https://doi.org/10.51896/tectzapic/IQCL5337>
- [22] Allauca, F. (2011). *Influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas en varillas de acero* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1401>
- [23] Peña, M. (2022). *Comportamiento frente a fatiga de barras de acero corrugado: Estudio experimental, estructural y numérico* [Tesis de maestría, Universidad de Cantabria]. Repositorio institucional de la Universidad de Cantabria. <https://hdl.handle.net/10902/26153>
- [24] Yan, S., Zheng, Y. L., Yan, Z. W., & Zhang, Z. C. (2025). Influence of bending angles on initial damage and mechanical properties of bent rebars. *Construction and Building Materials*, 499, 144124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144124>
- [25] Zhou, Y., Ou, Y. C., Lee, G. C., & O'Connor, J. S. (2010). Mechanical and low-cycle fatigue behavior of stainless reinforcing steel for earthquake engineering applications. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(3), 449-457. <https://doi.org/10.1007/s11803-010-0028-y>
- [26] Dieter, G. E., & Bacon, D. (1976). *Mechanical metallurgy*. McGraw-Hill.
- [27] Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (1992). *Physical Metallurgy Principles* (3rd ed.). PWS-KENT Publishing Company.
- [28] Hertzberg, R. W., Vinci, R. P., & Hertzberg, J. L. (2020). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- [29] Park, R., & Paulay, T. (1991). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- [30] Bruneau, M., Uang, C. M., & Whittaker, A. S. (1998). *Ductile design of steel structures*. McGraw-Hill.

Inversion of two-flux and four-flux radiative transfer models in WO₃-NiO electrochromic devices

David Barrios^{1,2*}, Carlos Alvarez², Jose Miguitama², Armando Fabrizio Lopez-Vargas²

¹ Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, Spain

² Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, Ecuador

*Autor para correspondencia/ corresponding author: dbarriosp76@gmail.com

Inversión de los modelos de transferencia radiativa de dos flujos y de cuatro flujos en dispositivos electrocrómicos de WO₃-NiO

Abstract

Intrinsic and extrinsic scattering and absorption coefficients (S&A-C) of four inorganic electrochromic device (ECD) samples were determined at their bleached-off optical state (BOOS, 0 V) and at their colored-on optical state (COOS, +3 V DC). The same inversion procedure previously applied to suspended particle device (SPD) and polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) samples, approximated for a single layer sandwich structure, was used here for a third smart window technology, based on redox reactions. The four studied ECDs incorporated cathodic WO₃ and anodic NiO layers corresponding to the four possible combinations of two thicknesses for each material—single (120 nm) and double (240 nm)—within their sandwich structures. The analysis of their S&A-C was performed in three stages. First, determination of optical constants using the collimated solutions of the four-flux model (4FM) from collimated transmittance and reflectance (T&R) measurements. Second, estimation of extrinsic S&A-C from the two-flux model (2FM) using total (collimated + diffuse) T&R data. Third, extraction of intrinsic S&A-C from the diffuse 4FM solutions by means of diffuse T&R data, employing the diffuse interface reflectance, an approximate average crossing parameter, and the forward scattering ratio. Although light scattering was found to be weak, absorption for the COOS showed a clear dependence on the WO₃-NiO active layers thicknesses: neutral gray ECD11 (single WO₃-single NiO), brownish gray ECD12 (single WO₃-double NiO), bluish gray ECD21 (double WO₃-single NiO), and dark gray ECD22 (double WO₃-double NiO). As expected, similar optical appearances were observed in the BOOS for the four ECDs. The values weighted by the CIE 1931 standard observer color matching function (\bar{y}) indicate that increasing the WO₃ thickness twofold leads to a larger absorption coefficient increment than a twofold increase in the NiO thickness. The single-layer 4FM implementation adopted in this study provides reliable agreement in the 250–1500 nm wavelength range, while fitting inaccuracies appear beyond 1500 nm (i.e., in the 1500–2500 nm region) between the calculated and the measured diffuse transmittance at BOOS, for ECD11 and ECD22, and at COOS, for ECD11. No fitting inaccuracies were observed between the calculated and the measured diffuse reflectance. Concerning the 2FM study, an excellent agreement in fitting was observed between the calculated and the measured total T&R for the four ECD samples.

Keywords: optical constants, average crossing parameter, forward scattering ratio, diffuse fractions of light, extinction, intrinsic and extrinsic coefficients, smart windows.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Edgar Carrera Jarrin

Recibido /
Received:
12/11/2025

Aceptado /
Accepted:
28/01/2026

Publicado en línea /
Published online:
14/05/2026



Resumen

Los coeficientes de dispersión y absorción (S&A-C) intrínsecos y extrínsecos de cuatro muestras de dispositivo electrocrómico (ECD) inorgánico fueron determinados en su estado óptico aclarado-apagado (BOOS, 0 V) y en su estado óptico coloreado-encendido (COOS, +3 V CC). El mismo procedimiento de inversión previamente aplicado con muestras de un dispositivo de partículas suspendidas (SPD) y de cristales líquidos dispersos en polímero, aproximado para una estructura sándwich de una única capa sustrato, fue aquí utilizado para una tercera tecnología de ventanas inteligentes, basada en reacciones redox. Los cuatro ECD estudiados incorporaron capas catódicas de WO_3 y capas anódicas de NiO correspondientes a las cuatro combinaciones posibles de dos espesores para cada material —simple (120 nm) y doble (240 nm)— dentro de sus estructuras tipo sándwich. El análisis de sus S&A-C se realizó en tres etapas. Primero, determinación de las constantes ópticas usando las soluciones colimadas del modelo de cuatro flujos (4FM) y considerando las medidas de transmitancia y reflectancia (T&R) colimadas. Segundo, estimación de los S&A-C extrínsecos a partir del modelo de dos flujos (2FM) usando los datos de T&R totales (colimados + difusos). Tercero, extracción de los S&A-C intrínsecos a partir de las soluciones difusas del 4FM mediante los datos de T&R difusos, empleando la reflectancia difusa de interface, un parámetro de camino promedio aproximado, y el porcentaje de dispersión hacia adelante. Aunque la dispersión de luz resultó ser débil, la absorción para los COOS mostró una dependencia clara con el espesor de las capas activas $\text{WO}_3\text{-NiO}$: ECD11 gris neutro (simple WO_3 -simple NiO), ECD12 gris con un tinte marrón (simple WO_3 -doble NiO), ECD21 gris con un tinte azul (doble WO_3 -simple NiO) y ECD22 gris oscuro (doble WO_3 -doble NiO). Como se esperaba, se observaron apariencias ópticas similares para los BOOS de los cuatro ECDs. Los valores ponderados por la función de correspondencia de color del observador estándar CIE 1931 (\bar{y}) indican que aumentar el espesor de WO_3 al doble conduce a un incremento del coeficiente de absorción mayor que un aumento del doble del espesor de NiO. La implementación de 4FM de una sola capa adoptada en este estudio proporciona un acuerdo confiable en el rango de longitud de onda de 250 a 1500 nm, mientras que aparecen imprecisiones de ajuste más allá de los 1500 nm (es decir, en la región de 1500 a 2500 nm) entre la transmitancia difusa calculada y medida en el BOOS, para los ECD11 y ECD22, y en el COOS, para el ECD11. No se observaron imprecisiones de ajuste entre la reflectancia difusa calculada y medida. Respecto al estudio del 2FM, se observó un acuerdo excelente en el ajuste entre la T&R totales calculadas y medidas para las cuatro muestras de ECD

Palabras clave: constantes ópticas, parámetro de camino promedio, porcentaje de dispersión hacia adelante, fracciones difusas de la luz, extinción de la luz, coeficientes intrínsecos y extrínsecos, ventanas inteligentes.

INTRODUCTION

Chromogenic electrochromic devices (ECDs) regulate the amount of transmitted light by applying an external electric potential, making them key components of smart window technologies. The energy consumption for heating, cooling and lighting of buildings (which is around 30-40% of the primary energy used in the world) can be reduced by using smart windows technologies [1]. These devices exhibit two optical

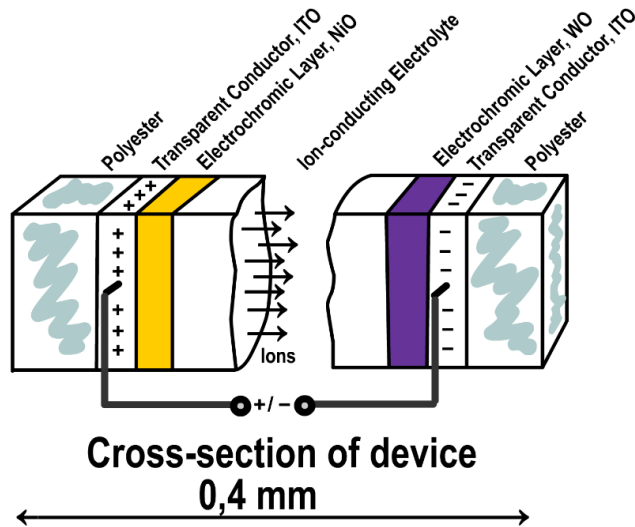


FIGURE 2. Sandwich structure of inorganic EC smart windows based on tungsten oxide, nickel oxide, and indium tin oxide (ITO) transparent conductors [2].

However, thin films are not considered in this study, which focuses on a single-layer (substrate) approximated analysis of four $\text{WO}_3\text{-NiO}$ ECDs using the procedure established in previous works [13, 14, 15]. The same methodology was previously applied to the SPD sample [13]—analyzed at dark-off and clear-on states—and to polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) samples [14, 15]—analyzed at translucent-off and transparent-on states. Each sample contains WO_3 and NiO active layers deposited on FTO-coated glass, separated by an electrolyte substrate layer (Fig. 2). The four ECD were characterized for both BOOS and COOS. Collimated, diffuse, and total transmittance (T) and reflectance (R) measurements (T&R-M) were used to determine the OC and the intrinsic and extrinsic S&A-C through the single-layer approach described in [13, 14, 15].

The main contribution of this work, compared with previous studies, lies in evaluating the applicability of the single-layer procedure previously employed for SPD and PDLC samples [13, 14, 15]—where both scattering and absorption occur (with absorption dominating in SPD and scattering in PDLC)—to samples in which scattering is nearly negligible and absorption clearly predominates, such as ECDs. The optical characterization process carried out involves three main stages:

A. First stage: Determination of OC from collimated T&R components

Real (n) and imaginary (k) parts of the complex refractive index ($\tilde{n} = n - i\kappa$) or OC are obtained from the collimated T&R-M, i.e., the regular T (T_{reg}) and specular R (R_{spe}). From the OC, the complex Fresnel reflection coefficient is calculated, and its squared modulus yields the collimated interface reflectance (r_c), obtaining the same values for external (r_c^e) and internal (r_c^i) components, i.e., a single r_c value for both propagation directions ($r_c^e = r_c^i$). Since all measurements were taken at normal incidence, polarization averaging



is unnecessary. The extinction coefficient (ϵ), related to both scattering and absorption, depends on κ and the wavelength (λ) as $\epsilon = 4\pi\kappa/\lambda$, resulting in the collimated substrate layer attenuation $\tau_c = \exp(-\epsilon \cdot dz)$.

B. Second stage: Estimation of extrinsic S&A-C (S & K) from total T&R components

The Kubelka–Munk two-flux model (KM-2FM) [16] with Saunderson correction [17] is applied to account for interface effects. Analytical hyperbolic solutions for R [16] and for T [18] were used with total T&R-M. Although the KM-2FM was initially formulated for diffuse T (T_{dif}) and R (R_{dif}), samples exhibiting both collimated and diffuse components are analyzed using total values ($T_{tot} = T_{reg} + T_{dif}$, $R_{tot} = R_{spe} + R_{dif}$) [19]. Diffuse light fractions (q) are employed to compute the total interface reflectance $\omega = r_c(1-q) + r_d \cdot q$, where r_d is the diffuse interface reflectance. Two distinct ω values (ω^i and ω^j) appear at the front ($z = \delta$) and back ($z = 0$) interfaces, corresponding to forward (i) and backward (j) propagation, respectively (using q^i and q^j). For external illumination only from the front interface ($i^\delta = i_c^\delta = 1$), $q^j = 0$, and therefore q^i and ω^i are not required. The expressions for q^i and q^j were originally derived from SPD data [20, 21]. In [13], a fitting discrepancy observed in the visible range for R_{tot} [20, 21] was corrected following a suggestion by David MacAdam (Kodak) to Kottler [22], introducing the critical internal reflection angle (θ_c) as the upper integration limit for computing r_d [23]. Earlier works had integrated up to 90° [19, 24, 25], obtaining different values for external (r_d^e) and internal (r_d^i) components. However, using θ_c instead of 90° yielded a single r_d value for both propagation directions ($r_d^e = r_d^i$), analogous to r_c ($r_c^e = r_c^i$), which resolved the 2FM inconsistencies and enabled the accurate determination of the intrinsic coefficients.

C. Third stage: Extraction of intrinsic S&A-C (α and β) from diffuse T&R components

The Maheu–Letoulozan–Gouesbet four-flux model (MLG-4FM) [26] is applied using the diffuse T&R-M (T_{dif} and R_{dif}). The average crossing parameter (ACP) was approximated in [27, 28, 29] using collimated and diffuse intensities at the interfaces: $ACP = 1 + (i_d^0 + j_d^\delta) / (i_c^0 + i_d^0 + j_c^\delta + j_d^\delta) = 1 + (i_d^0 + j_d^\delta) / (i^0 + j^\delta)$, with $i^0 = i_c^0 + i_d^0$ and $j^\delta = j_c^\delta + j_d^\delta$ representing total intensities. The absorption coefficient (α) and forward scattering ratio (FSR) are determined in a fitting process, and β follows from $\epsilon = \alpha + \beta$. The consistency between 2FM and 4FM solutions is verified through feedback relations between ACP and FSR (ACP_{fb} and FSR_{fb}) according to Vargas's expressions [30]. The same four WO₃-NiO ECDs analyzed here were also studied in [31] using a simplified estimation of ACP and FSR: $ACP = 1 + (T_{dif} + R_{dif}) / (T_{tot} + R_{tot})$, $FSR = T_{dif} / (T_{dif} + R_{dif})$, later referred to as the RT-method in [32].

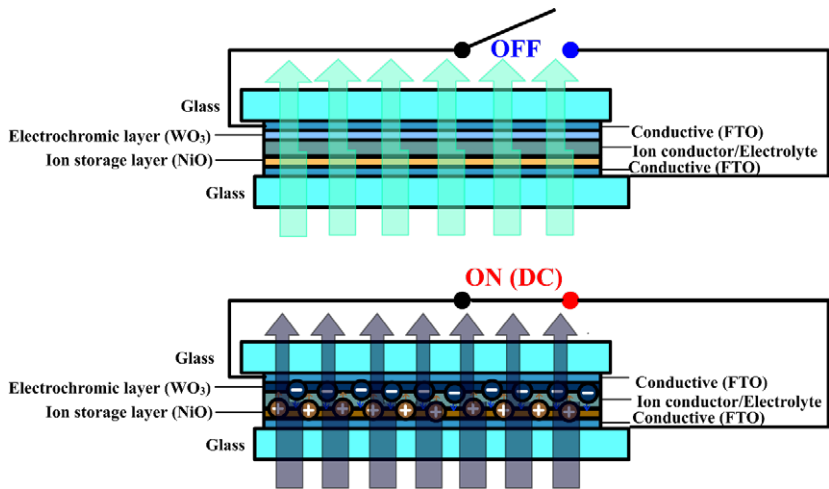


FIGURE 3. Sandwich structure and principle of operation of an inorganic $\text{WO}_3\text{-NiO}$ based ECD smart window at BOOS (above) and COOS (below) [33].

MATERIALS AND METHODS

The optical T&R-M of four $\text{WO}_3\text{-NiO}$ -based ECD samples—designated as ECD11 (single WO_3 -single NiO), ECD12 (single WO_3 -double NiO), ECD21 (double WO_3 -single NiO), and ECD22 (double WO_3 -double NiO)—were performed in [31, 33] and are reused in this study following the same analytical procedure described in [13, 14, 15]. The novelties obtained for the $\text{WO}_3\text{-NiO}$ -based ECD samples are related to the second and third stages, i.e., for determining the intrinsic and extrinsic S&A-C, due to the θ_c limit of the integration used to determine r_d (not used in previous procedure [21, 22]). These samples and their measurements were conducted at the Laboratory for Spectroscopy of Materials at the National Institute of Chemistry, Ljubljana, Slovenia. The ECDs share the same sandwich-type configuration as shown in Fig. 3 [33], consisting of TC electrodes, two EC films (WO_3 and NiO), and an electrolyte substrate layer. The COOS was achieved by applying a +3 V DC bias, while the BOOS was obtained either at 0 V (open circuit, high impedance) or by applying -3 V DC. Optical characterization was performed using a Perkin Elmer Lambda 950 spectrophotometer equipped with an integrating sphere, which allowed the collection of the diffuse components of both T&R. Total and diffuse T&R-M were recorded across the SWR, from 250 to 2500 nm, with a spectral step of 5 nm. The collimated T&R components were then obtained by subtracting the diffuse T&R-M from the total T&R-M.

In addition to these measurements—used later in the Results section—an extra set of measurements was taken with another spectrometer without an integrating sphere, to acquire the collimated transmitted light intensity through the samples. These data were used to compute the direct T ($T_{\text{dir}}=T_{\text{reg}}$) for the separated WO_3 and NiO active layers [31, 33]. These additional measurements were performed on glass-FTO- WO_3 and glass-FTO-NiO samples, which were not assembled into complete devices. Instead, they were placed in a cell containing a liquid electrolyte to independently achieve optical switching between BOOS and COOS. Fig. 4 presents the T_{dir} spectra for WO_3 (a), NiO (b), and the calculated



WO₃-NiO combination (c) at both optical states. Since for two interfaces “A” and “B” and light propagating in forward (i) and backward (j) directions, $T_{AB}^i = T_A^i \cdot T_B^i / (1 - R_A^i \cdot R_B^i)$, this expression can be approximated as $T_{AB}^i = T_A^i \cdot T_B^i$ if $R_A^i = R_B^i = 0$. This approximation was applied because R_{spe} for the separated WO₃ and NiO active layers could not be measured with the experimental setup used for T_{dir} . Fig. 4(d) shows the colorimetric results for the spectra in panels (a)–(c). ECD11 and ECD12 contain single WO₃, while ECD11 and ECD21 include single NiO. ECD21 and ECD22 use double WO₃, and ECD12 and ECD22 use double NiO. Consequently, the approximate colors of ECD11 and ECD22 correspond to neutral grey and dark neutral grey, respectively (due to the doubled active-layer thickness), whereas ECD21 appears bluish neutral grey and ECD12 shows a brownish neutral grey tone.

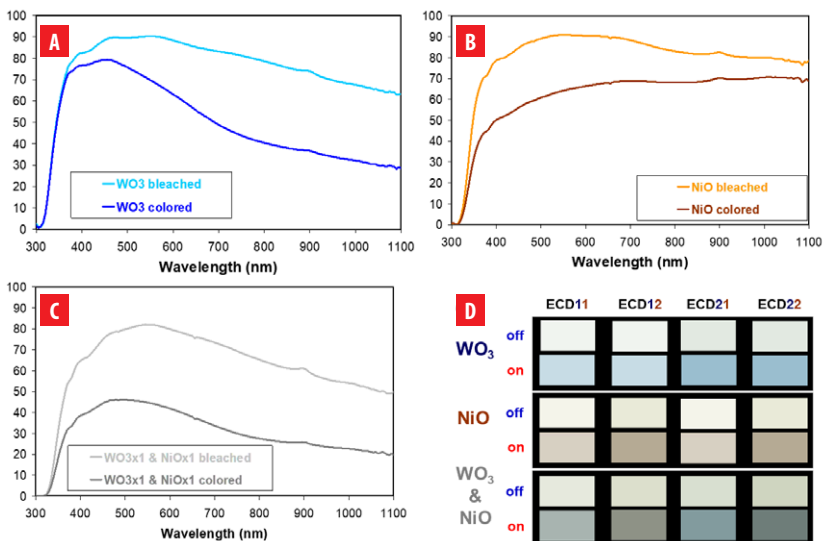


FIGURE 4: Direct transmittance of separated active layers used in the ECD smart window samples: **A** WO₃, **B** NiO, **C** approximated WO₃-NiO and **D** sRGB coloration appearances determined from CIE Yxy 1931 chromaticity coordinates. In the four subfigures, at BOOS and COOS [31, 33].

RESULTS

As outlined in the Introduction, the same methodology previously applied to SPD and PDLC samples [13, 14, 15] was used here to characterize four WO₃-NiO ECDs with two different active-layer thicknesses (120 nm and 240 nm) of their active layers WO₃ and NiO, for both BOOS and COOS. In Figures 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, the four ECD samples—ECD11, ECD12, ECD21, and ECD22—are labeled as samples 1–4, respectively.

A. First stage: Determination of OC from collimated T&R components

The collimated T&R-M and their fittings for the four ECDs in both BOOS and COOS are shown in Fig. 5. The agreement between measured and fitted data is excellent for both optical states. A higher contrast is observed in T_{reg} (Fig. 5a) than in R_{spe} (Fig. 5b). In the COOS, T decreases markedly, while R increases slightly across the visible range. The intermediate



parameters r_c and ε were derived from the MLG-4FM [19] cc equations (Fig. 6). These were obtained by fitting the computed T_{cc} and R_{cc} values to the experimental T_{reg} and R_{spe} data. As expected, r_c (Fig. 6a) correlates more closely with R_{spe} , whereas the attenuation term τ_c (Fig. 6b) is primarily associated with T_{reg} . The ε coefficients are higher in the COOS than in the BOOS, consistent with the EC response.

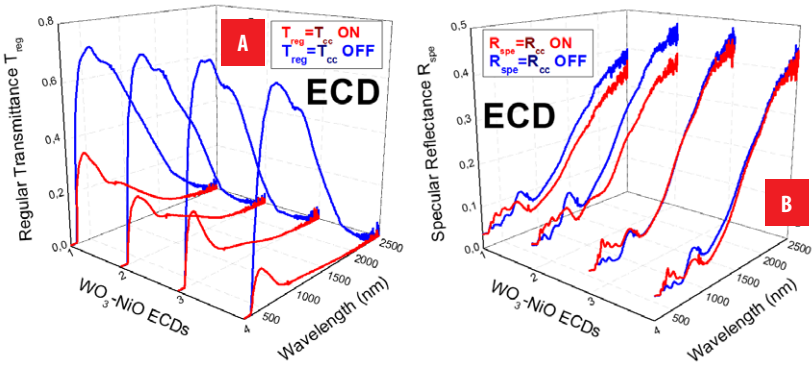


FIGURE 5: Collimated results: T&R-M and fittings. A T_{reg} and T_{cc} . B R_{spe} and R_{cc} .

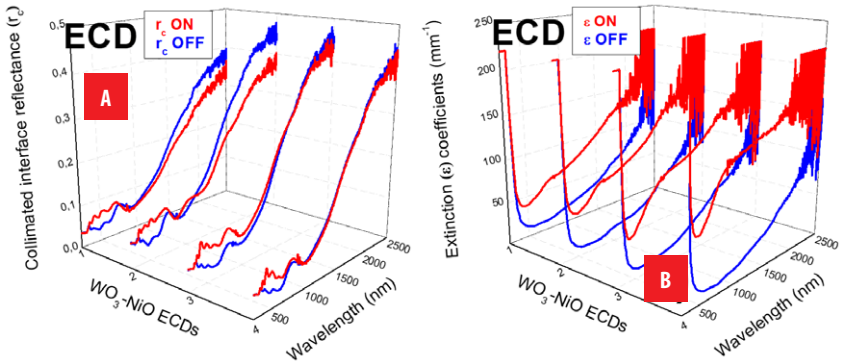


FIGURE 6: Collimated intermediate parameters: A r_c . B ε coefficients (mm^{-1}).

B. Second stage: Estimation of extrinsic S&A-C (S & K) from total T&R components

The fitted total T and R (T_t and R_t) are compared with the measured T_{tot} and R_{tot} in Fig. 7. Note that almost all light transmitted and reflected by the ECDs is collimated, causing the similarities between T_{reg} (Fig. 7a) and T_{tot} (Fig. 5a) and between R_{spe} (Fig. 7b) and R_{tot} (Fig. 5b). The resulting extrinsic coefficients S and K are displayed in Fig. 8. As expected for ECDs with low optical haze, S (Fig. 8a) remains lower than K (Fig. 8b). Fig. 9a shows q_0^i and q_δ^j , while Figure 9b presents ω_0^i and ω_δ^j . The strong inequality $q_\delta^j \gg q_0^i$ reflects the fact that, in the backward direction (j) at the front interface (δ), light crosses the internal turbid layer twice, whereas in the forward direction (i) at the rear interface (0), it traverses it only once. Fig. 10a displays the refractive index n , and Fig. 10b the corresponding r_d , which describes the diffuse reflection behavior at the interfaces.

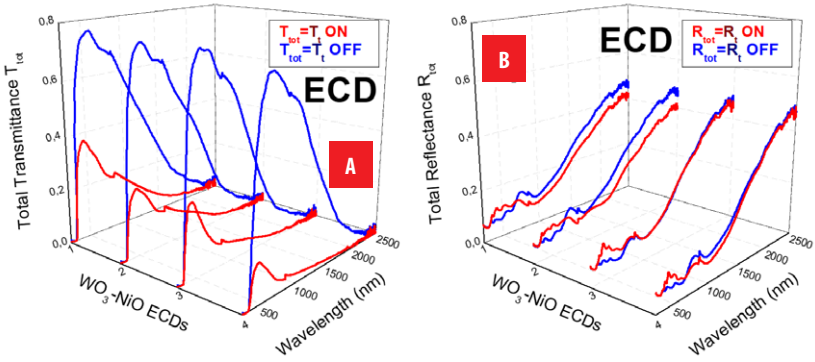


FIGURE 7: Total results: T&R-M and fittings. **A** T_{tot} and T_t ; **B** R_{tot} and R_t .

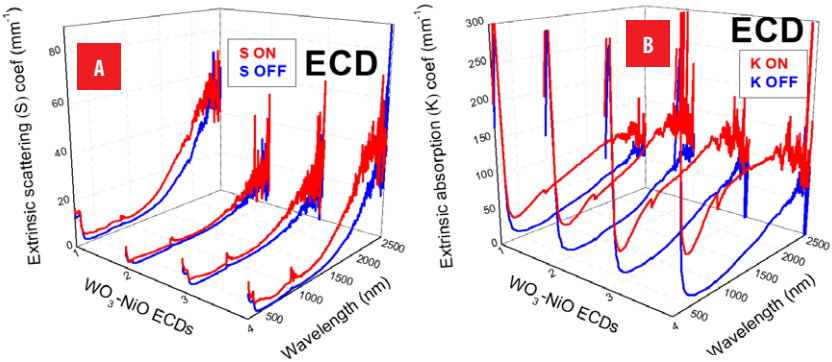


FIGURE 8: Extrinsic S&A-C (mm^{-1}): **A** S and **B** K coefficients.

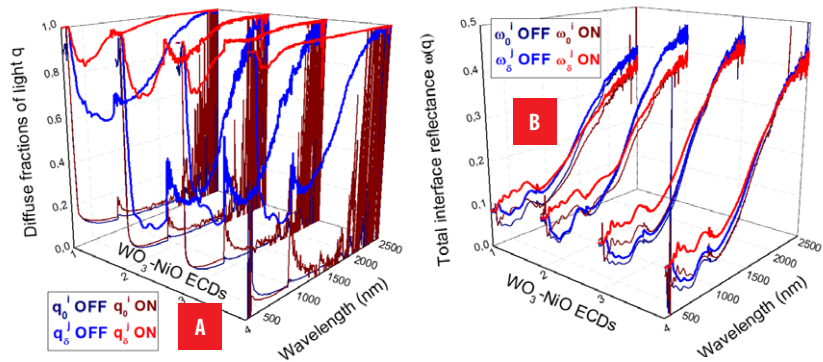


FIGURE 9: **A** Diffuse fractions of light q and **B** total interface reflectance ω .

C. Third stage: Extraction of intrinsic S&A-C (α and β) from diffuse T&R components

The diffuse T&R-M and their fittings to the MLG-4FM [19] cd equations are shown in Fig. 11 for both optical states. The intrinsic coefficients α and β are presented in Fig.



12. As observed for the extrinsic coefficients, α (Fig. 12a) remains lower than β (Fig. 12b), consistent with the low haze of the ECDs. The fittings are excellent over most of the SWR. Deviations are observed exclusively in the T_{dif} of ECD11 and ECD22 at BOOS and of ECD11 at COOS, starting at approximately 1500 nm. Above approximately 2000 nm, an additional increase in fluctuations is observed in T_{dif} , while R_{dif} and all collimated and total components remain unaffected over the entire spectral range. This deviation also appears in Fig. 13, where differences between the fitted and feedback (fb) ACP (Fig. 13a) and FSR (Fig. 13b) values become more pronounced above 1500 nm.

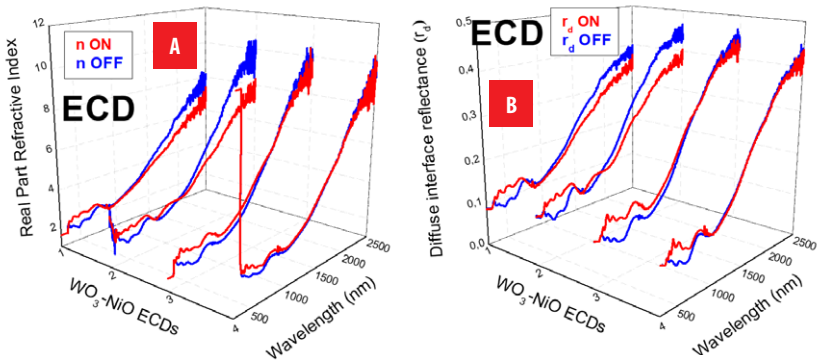


FIGURE 10: A Real part of refractive index n and **B** diffuse interface reflectance r_d .

For improved clarity, the fittings of the collimated, diffuse, and total T&R measurements to the calculated values obtained using the 4FM (collimated T&R in Fig. 5 and diffuse T&R in Fig. 7) and the 2FM (total T&R in Fig. 11), for both BOOS and COOS, are presented in Fig. 17 (transmittance) and Fig. 18 (reflectance). The only discrepancies between calculated and measured data are observed in the diffuse transmittance for ECD11 and ECD22 at BOOS, and for ECD11 at COOS, consistently within the wavelength range of 1500–2500 nm. The fitting error within the 250–1500 nm range is negligible compared to the experimental uncertainty.

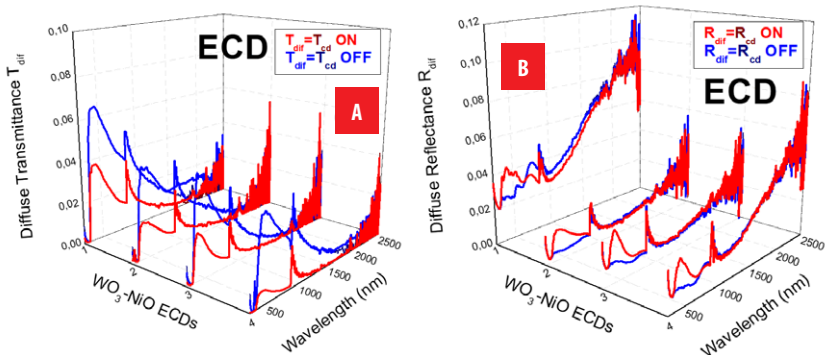


FIGURE 11: Diffuse results: T&R-M and fittings. A T_{dif} and T_{cd} and **B** R_{dif} , and R_{cd} .

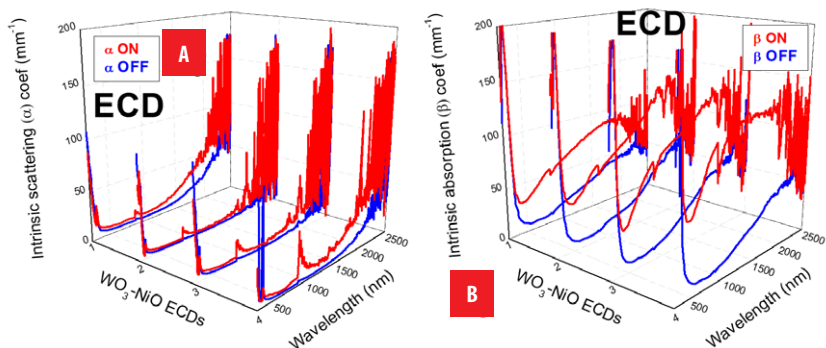


FIGURE 12: Intrinsic S&A-C: A α and B β (mm^{-1}).

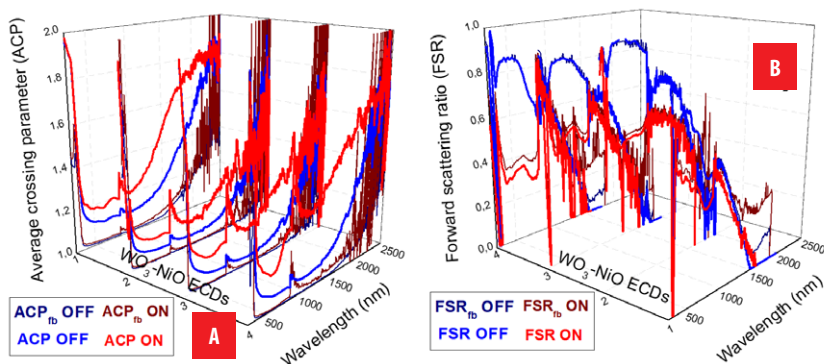


FIGURE 13: A ACP and ACP_{fb} B FSR and FSR_{fb}.

DISCUSSION

The onset of the discrepancies around 1500 nm precedes the spectral region where instrumental noise becomes significant. Therefore, the deviations observed between 1500 and 2000 nm are mainly attributed to the simplifying assumptions of the present single-layer implementation of the IJ-method, in which identical ACP and FSR values are assumed for both propagation directions and for both collimated and diffuse radiation. For wavelengths above approximately 2000 nm, the quality of the diffuse transmittance measurements is additionally affected by experimental noise. This originates from the absence of a standard light trap (black cone) in the integrating sphere, which was replaced by black sandpaper, leading to increased fluctuations in the diffuse signal. This effect does not influence the reflectance measurements.

Beyond the internal consistency of the 4FM and 2FM formulations, it is important to position the present approach within the broader framework of optical modeling of electrochromic devices (ECDs). Conventional methods such as the transfer-matrix method (TMM) and effective medium theory (EMT) are widely used to describe multilayer optical systems. While these approaches provide rigorous solutions when the complex refractive indices and precise thicknesses of each layer are



known, they typically focus on coherent propagation and specular components. In contrast, the present 4FM formalism operates directly with radiometric quantities and explicitly separates collimated and diffuse contributions, allowing experimental validation without requiring detailed microscopic optical constants. This makes the method particularly suitable for practical ECD characterization, where scattering and absorption coexist and may vary with the EC state.

Furthermore, the distinction between intrinsic (4FM) and extrinsic (2FM) coefficients provides additional diagnostic value. The intrinsic formulation captures the full internal radiative transport within the multilayer structure, whereas the extrinsic approximation neglects higher-order internal interactions. The discrepancy between both formulations therefore quantifies the impact of multiple scattering and nonlinear absorption effects, especially under strong coloration (COOS). This separation is not merely mathematical but offers a practical tool to identify performance limitations and to guide multilayer optimization strategies in ECD design. Overall, these results demonstrate that the IJ-based 4FM formulation not only reproduces the spectral response of electrochromic multilayer devices with high accuracy in the 250–1500 nm range, but also provides physically interpretable intrinsic parameters that enable separation of absorption and scattering mechanisms and quantitative assessment of multilayer coupling effects. This dual capability distinguishes the present approach from conventional purely coherent optical models and highlights its relevance for practical ECD analysis and optimization.

To predict the optical appearance of the four ECDs from the T data of the isolated WO₃ and NiO EC active layers shown in Fig. 4a [31, 33], the T of the four ECD was calculated in Fig. 16 over the visible wavelength range (VWR) using the approximation $T_{AB^i} = T_{A^i} \cdot T_{B^i}$, described at the last paragraph of the Introduction. The approximated T were then compared with the measured T_{reg} values of Fig. 5a (also plotted in Fig. 14a for BOOS and in Fig. 14b for COOS, together with the excellent agreement in fittings). Neglecting the glass, FTO, and electrolyte layers, as well as the R of the EC WO₃ and NiO active layers, the approximation assumed $T_{AB^i} = T_{A^i} \cdot T_{B^i}$, where T_{A^i} corresponds to WO₃ (single or double) and T_{B^i} to NiO (single or double). The T of double-thickness layers was obtained as the square of the single-thickness T, i.e., $T_{b^2} = T_{b^1} \cdot T_{b^1}$ for the BOOS and $T_{c^2} = T_{c^1} \cdot T_{c^1}$ for the COOS, as shown in Figs. 16a and 16b for WO₃ and NiO, respectively. In this way, T_{b^1} , T_{b^2} , T_{c^1} and T_{c^2} are the T of constructed single layer (T_{b^1} and T_{c^1}) and of simulated double layers (T_{b^2} and T_{c^2}) for separated EC layers, i.e., for WO₃ in Fig. 16a and for NiO in Fig. 16b. These T_{A^i} and T_{B^i} values were then used to approximate the calculated T shown in Fig. 16c ($T_x^{11} = T_x^1 \cdot T_x^1$, $T_x^{12} = T_x^1 \cdot T_x^2$, $T_x^{21} = T_x^2 \cdot T_x^1$ and $T_x^{22} = T_x^2 \cdot T_x^2$, with $x = b$ for BOOS and $x = c$ for COOS). To test the approximation $T_{AB^i} = T_{A^i} \cdot T_{B^i}$, the calculated T shown in Fig. 16c can be compared with the measured T spectra in Fig. 16d (in Fig. 5a and in Fig. 14a and 14b for the SWR), for ECD11, ECD12, ECD21, and ECD22).

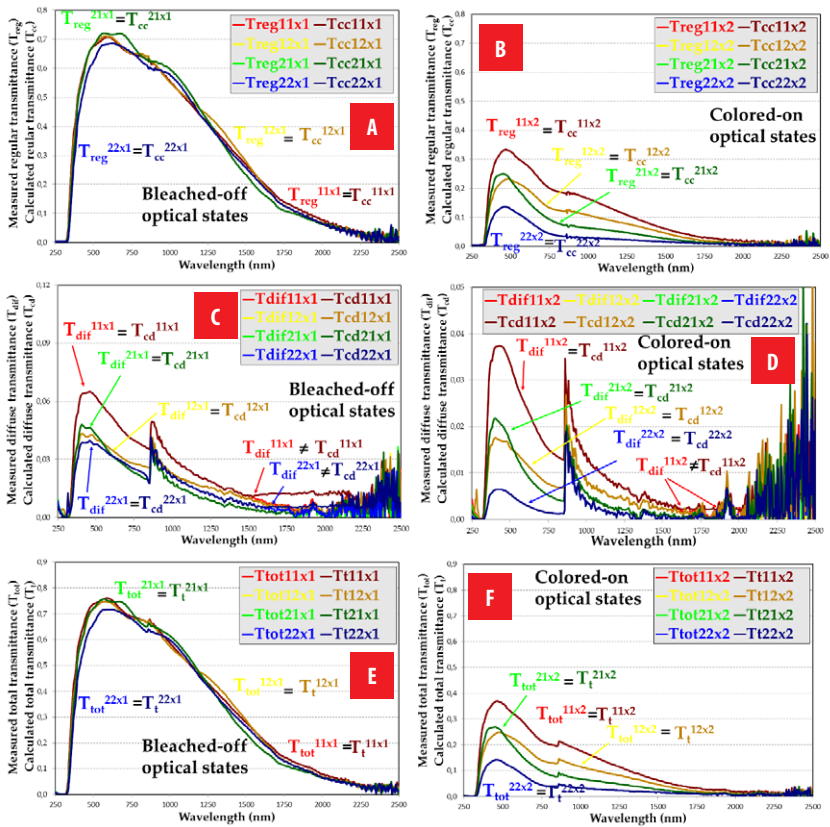


FIGURE 14: Measured and calculated T of the four WO_3 -NiO ECDs: BOOS **A** and COOS **B** regular T , BOOS **C** and COOS **D** diffuse T , and BOOS **E** and COOS **F** total T . Discrepancies only between T_{dif} and T_{cd} for ECD11 and ECD22 samples.

From the measured collimated T (T_{reg}) shown in Fig. 16 for the VWR, the CIE 1931 xy chromaticity coordinates of the four WO_3 -NiO ECDs for both BOOS and COOS were determined and presented in Fig. 17. For separated EC layers, T values of Fig. 16a and 16b are used to determine the CIE 1931 xy values for BOOS1, BOOS2, COOS1 and COOS2, of Fig. 17a and Fig. 17b, respectively. Concerning the ECDs, for the calculated cases, the BOOS11, BOOS12, BOOS21 and BOOS22 (of Fig. 17c) and the COOS11, COOS12, COOS21 and COOS22 (of Fig. 17d) were determined with the T_b^{11} , T_b^{12} , T_b^{21} and T_b^{22} and the T_c^{11} , T_c^{12} , T_c^{21} and T_c^{22} of Fig. 16c. In the same way, for the measured cases, the CIE 1931 xy values of Fig. 17e and Fig. 17f were determined with the data of Fig. 16d. Comparison of the calculated with the approximation and the measured ECDs can be carried out with Fig. 16c and Fig. 16d, for T data, and with Fig. 17c and Fig. 17e, for BOOS and with Fig. 17d and Fig. 17f, for COOS, for CIE 1931 chromaticity values.

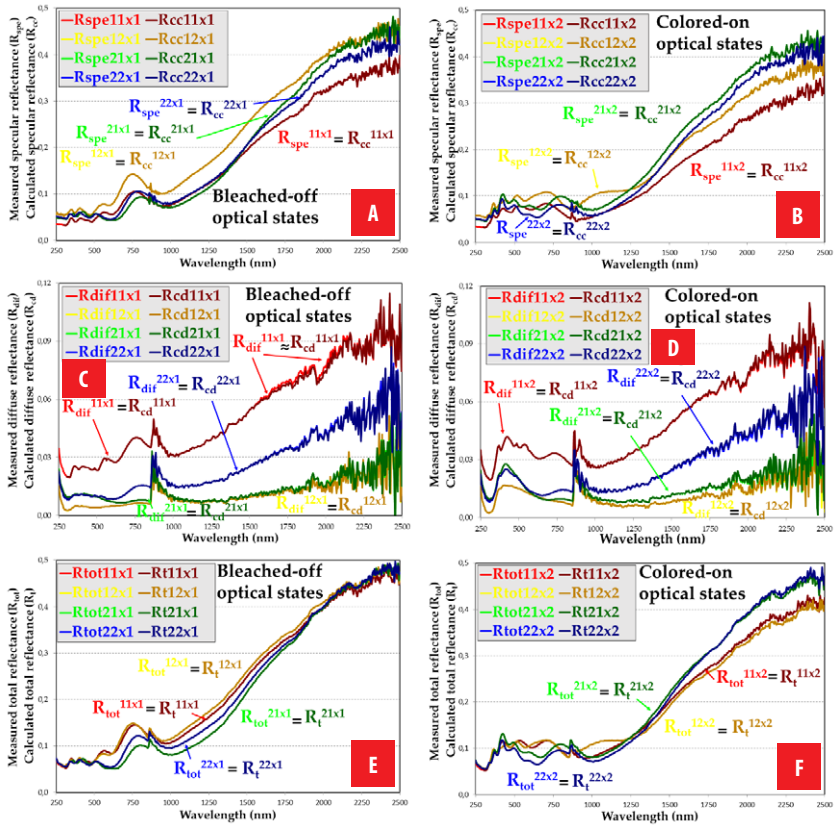


FIGURE 15: Measured and calculated R of the four WO₃-NiO ECDs: BOOS **A** and COOS **B** specular R , BOOS **C** and COOS **D** diffuse R , and BOOS **E** and COOS **F** total R . No discrepancies between measured and calculated R .

Given that the IJ method employed in this study for the 4FM provides reliable agreement within 250–1500 nm wavelength range, the determination of the intrinsic scattering and absorption coefficients (S&A-C) for the four ECDs, treated as a single layer in their sandwich configuration, must be considered approximate. The extrinsic S&A-C values should also be regarded as approximations, since the original 2FM was formulated for purely diffuse light propagation [16], owing to the two-flux structure of its governing differential equations. However, it was later suggested that the method can be reasonably extended to samples in which collimated T&R components coexist with diffuse T&R [20]. In any case, because the 4FM incorporates four fluxes instead of two, thereby accounting for additional radiative information, it can be considered, in principle, more accurate than the 2FM. Accordingly, Table 1 reports values averaged over the VWR, weighted by the human eye sensitivity curve, i.e., the CIE 1931 standard observer color matching function \bar{y} (2°). The numerical values in Table 1 indicate that, for the COOS, the increase in both the intrinsic and extrinsic absorption coefficients is greater for ECD21 than for ECD12; that is, doubling the thickness of WO₃ produces a larger effect than doubling the thickness of NiO.

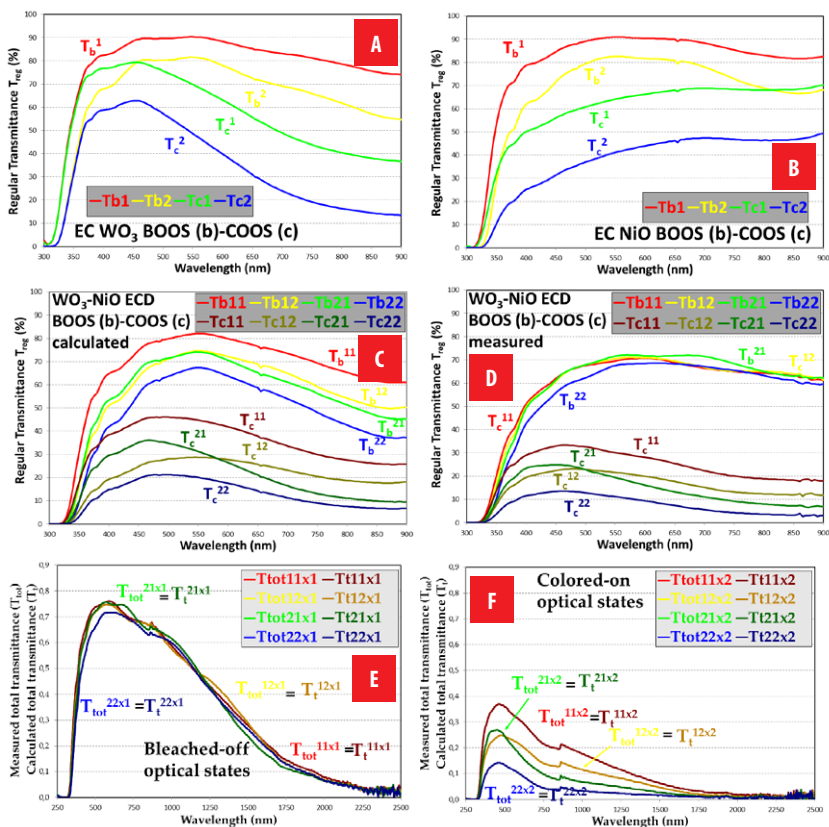


FIGURE 16: Regular T of the separated electrochromic layers and calculated and measured T for BOOS and COOS. Separated WO_3 **A** and NiO **B**. Calculated T, neglecting R of separated WO_3 and NiO layers, **C**, and measured T, of ECD11, ECD12, ECD21 and ECD22 **D**.

TABLE 1: Visible averaged values of intrinsic (α & β) and extrinsic (S & K) scattering and absorption coefficients and of imaginary part of refractive index (κ) obtained for ECD11, ECD12, ECD21 and ECD22, for BOOS and COOS.

Sample Parameter	BOOS ECDs				COOS ECDs			
	1	2	3	4	1	2	3	4
α (mm^{-1})	4.3839	2.1851	2.3764	2.4502	7.5006	4.4019	4.9746	4.8205
β (mm^{-1})	7.2558	8.1277	8.7753	10.8760	34.7830	49.2670	54.4340	77.2810
S (mm^{-1})	1.2236	0.0253	0.2614	0.3603	3.6464	1.7001	2.1008	3.0212
K (mm^{-1})	7.3049	8.1200	8.7977	77.7390	35.2960	49.5380	54.7960	77.7390
κ	0.0050	0.0045	0.0048	0.0058	0.0185	0.0235	0.0261	0.0360

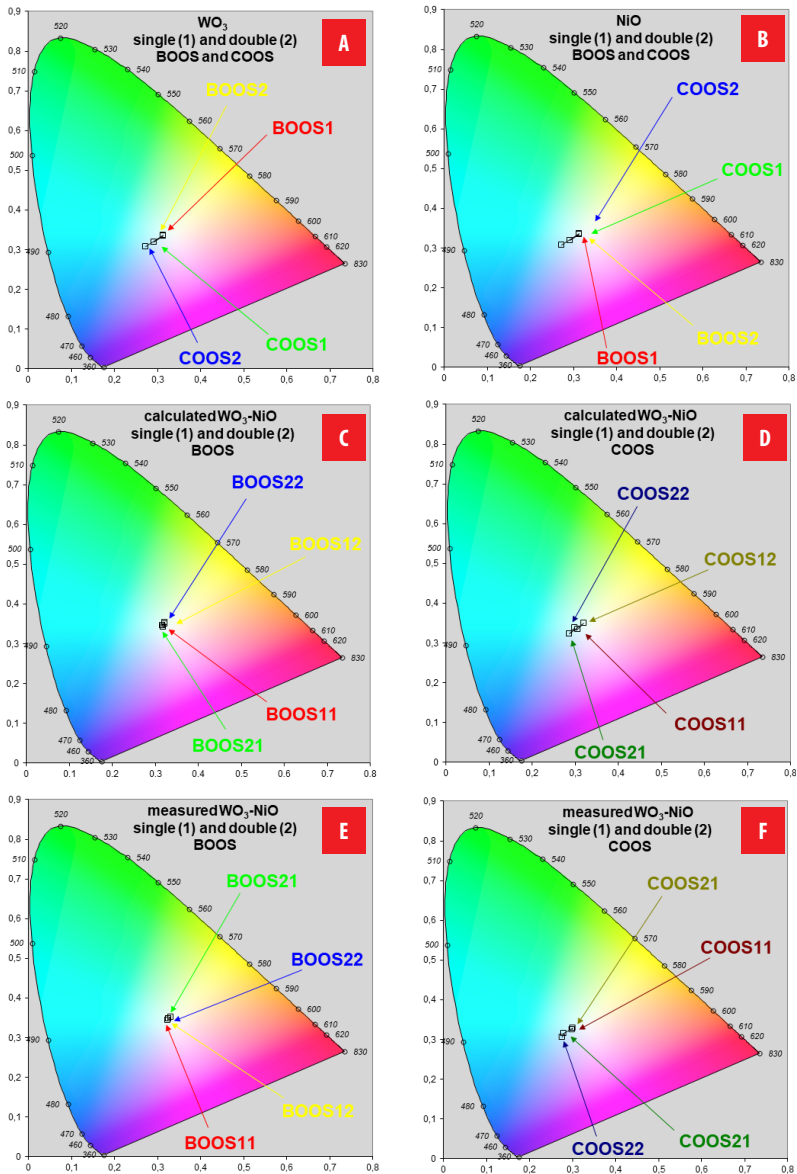


FIGURE 17: CIE 1931 xy chromaticity diagrams for single and double of separated EC layers at BOOS and COOS **A** WO_3 , **B** NiO, and of the complete ECDs **C** calculated BOOS, **D** calculated COOS, **E** measured BOOS and **F** measured COOS.

From the CIE XYZ tristimulus values [34, 35], the sRGB color representations of the four measured ECDs were computed and are displayed in Fig. 18. Accordingly, these results are compared with the calculated colors derived from the approximation, which neglects effects of the outer glass and FTO outer and the inner electrolyte layers, and the R

contributions of the individual WO_3 and NiO active layers. In this way, colors of inner squares of Fig. 18 were previously shown in the last two rows of Fig. 4d corresponding to WO_3 & NiO. The numerical data corresponding to Figs. 17 and 18 are summarized in Table 2.

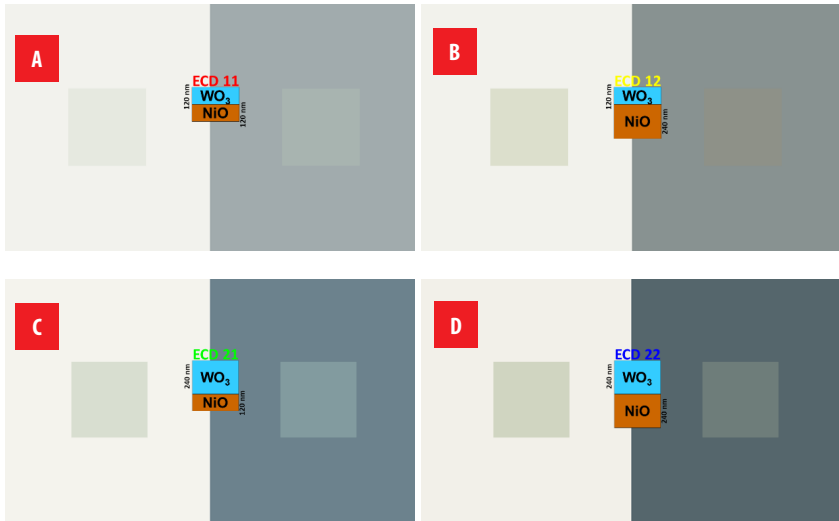


FIGURE 18: Comparison of the color perception from the determined sRGB values for the four WO_3 -NiO ECDs **A** ECD11, **B** ECD12, **C** ECD21 and **D** ECD22, for BOOS and COOS. The inner small square is related to the approximated values.

Note that the values listed in Table 2 correspond to the WO_3 and NiO samples with 120 nm thicknesses, whose T_{dir} spectra are shown in Fig. 4, and to the ECD11, ECD12, ECD21, and ECD22 devices, whose T_{reg} spectra are presented in Fig. 5a. The remaining samples are fictitious, obtained by assuming double thicknesses for WO_3 and NiO—denoted WO_3^2 and NiO^2 —and represented as squares following the approximation $T_{AB} = T_A \cdot T_B$. These fictitious configurations correspond to the ECD11 (WO_3 -NiO), ECD12 (WO_3 -NiO²), ECD21 (WO_3^2 -NiO), and ECD22 (WO_3^2 -NiO²). In these representations, the additional layers of the sandwich structure—namely, the outer glass substrates, the FTO TC coatings, and the internal electrolyte—were neglected. The R of the individual WO_3 and NiO layers was also disregarded, since only their T was considered. The differences in sRGB values between the measured and fictitious ECDs are smaller for the BOOS than for the COOS, as it can be deduced in Fig. 18. For the BOOS, the percentage deviations in R, G, and B coordinates were calculated as follows: 4.30%, 6.25%, and 7.03% for ECD11; 0.39%, 1.95%, and 1.17% for ECD12; -2.34%, 1.56%, and 2.34% for ECD21; and -4.30%, 0.00%, and -0.39% for ECD22. For the COOS, the corresponding values were 11.33%, 11.33%, and 8.59% for ECD11; 8.98%, 6.25%, and 1.95% for ECD12; 10.94%, 11.72%, and 8.20% for ECD21; and 12.11%, 11.33%, and 7.42% for ECD22. These differences were computed by subtracting the sRGB values of the fictitious samples from those of the measured ones and dividing by 256 (the number of discrete sRGB intensity levels).



TABLE 2. CIE 1931 xy and sRGB values of single and double samples WO₃, NiO, WO₃-NiO, WO₃-NiO², WO₃²-NiO, WO₃²-NiO², ECD11, ECD12, ECD21 and ECD22, for BOOS and COOS.

Sample	CIE 1931 xy for BOOS		CIE 1931 xy for COOS		sRGB values for BOOS			sRGB values for COOS		
	x	y	x	y	R	G	B	R	G	B
WO ₃	0.3133	0.3341	0.2928	0.3193	240	244	239	199	220	229
WO ₃ ²	0.3127	0.3372	0.2734	0.3070	226	233	225	154	190	207
NiO	0.3187	0.3392	0.3282	0.3455	244	244	234	215	208	194
NiO ²	0.3235	0.3472	0.3426	0.3589	233	234	216	181	170	148
WO ₃ -NiO	0.3181	0.3423	0.3064	0.3347	230	233	221	168	180	176
WO ₃ -NiO ²	0.3228	0.3502	0.3203	0.3491	220	223	204	142	146	134
WO ₃ ² -NiO	0.3174	0.3453	0.2862	0.3230	216	223	208	130	155	158
WO ₃ ² -NiO ²	0.3221	0.3532	0.2993	0.3383	207	213	192	110	125	121
ECD11	0.3238	0.3447	0.2985	0.3248	219	217	203	139	151	154
ECD12	0.3250	0.3475	0.3011	0.3298	219	218	201	119	130	129
ECD21	0.3307	0.3517	0.2803	0.3149	222	219	202	102	125	137
ECD22	0.3263	0.3481	0.2754	0.3067	218	213	193	79	96	102

The overall sRGB color distance, defined as the Euclidean distance between the R, G, and B components, yielded the following results: for BOOS, 10.34% (ECD11), 2.31% (ECD12), 3.66% (ECD21), and 4.31% (ECD22); and for COOS, 18.18% (ECD11), 11.12% (ECD12), 18.01% (ECD21), and 18.17% (ECD22). The relatively low color distances obtained for BOOS (< 10%) indicate that the approximation is reasonably accurate when predicting the optical appearance of the devices in their uncolored state (BOOS). The larger deviations observed for COOS suggest that the simplifications—namely, neglecting the optical effects of glass, FTO, electrolyte, and layer R—become less valid when the devices are colored. This occurs because, in COOS, the active layers develop stronger and narrower spectral absorption and scattering features. Small spectral shifts or shape variations thus lead to larger perceptual color differences. Furthermore, nonlinear interactions between layers (e.g., multiple reflections, interference, and interfacial coupling) become more significant when absorption increases, amplifying the discrepancies between the measured and approximated results.

CONCLUSIONS

In this work, the optical constants (OC) and the intrinsic and extrinsic scattering and absorption coefficients (S&A-C) of four WO₃-NiO electrochromic devices (ECD) were determined for all combinations of single and double active-layer thicknesses, at both bleached-off (BOOS) and colored-on (COOS) optical states. The study followed a single-layer procedure previously validated for suspended particle devices (SPD) [13] and polymer-dispersed liquid crystals (PDLC) [14, 15]. The OC (n and k), derived from the



collimated–collimated (T_{cc} and R_{cc}) equations of the four-flux model (4FM), were used to compute the collimated intermediate parameters (r_c and ϵ), from which the extrinsic and intrinsic S&A-C were subsequently obtained. Extrinsic S&A-C were calculated using the Kubelka–Munk two-flux model (KM-2FM) and the Saunderson correction for interfaces. However, when total transmittance and reflectance measurements (T&R-M) are used instead of diffuse ones, the approximation may become inaccurate for low-haze samples such as ECDs, where total and diffuse T&R-M components differ significantly. Moreover, the diffuse transmittance at longer wavelengths was measured with significant noise due to the absence of a proper light trap (black cone) in the integrating-sphere-based spectrometer, which is typically used to absorb diffuse radiation (i.e., acting as a light sink). In our setup, this component had to be improvised using black sandpaper. Consequently, the noisy diffuse T measurements led to increased uncertainty in the retrieved S and K values at longer wavelengths (>2000 nm). Similarly, intrinsic S&A-C determined from the collimated–diffuse 4FM equations (T_{cd} and R_{cd}) are less reliable above 1500 nm, since the same average crossing parameter (ACP) and forward scattering ratio (FSR) are assumed for both forward and backward propagation, and for both collimated and diffuse radiation.

The inverse scattering and absorption problem aims to determine the intrinsic (4FM) and extrinsic (2FM) S&A-C from T&R-M, thereby inferring the size, shape, and composition of the particles responsible for light scattering and absorption [36]. The original differential equations of the 4FM were formulated in [37]. The first analytical 4FM solutions proposed in [19] were complemented by the RT-method (see Introduction), which introduced a fifth equation for the ACP parameter. Later, this RT-method [31, 32] was replaced by the IJ-method [13, 14, 15], which uses forward (i) and backward (j) light intensities instead of T and R. In this study, the IJ-method was applied as the fifth equation required to solve the system of four equations (T_{cc} , R_{cc} , T_{cd} , R_{cd}) and five unknowns (n , κ , α , ACP, FSR), since $\beta = \epsilon - \alpha$. The IJ-method was later extended into the directed-IJ-method [38, 39], introducing two ACP parameters (for forward and backward propagation) and four FSR parameters (for forward/backward and collimated/diffuse radiation). In this case, $\text{ACP} = 1 + q$, i.e., $\text{ACP}^i = 1 + q^i = 1 + i\alpha^0 / i^0$ and $\text{ACP}^j = 1 + q^j = 1 + j\alpha^0 / j^0$.

The present results can be improved in future work by applying the newly developed equations for intrinsic S&A-C from the diffuse differential equations of the 4FM [38] and extrinsic S&A-C from the total differential equations of the 2FM [38, 39]. The new 2FM equations are valid for any haze level, since they are derived by expressing the total differential equations of the 2FM as the sum of the collimated and diffuse differential equations of the 4FM [39] for each propagation direction. These new formulations have already been applied to single-layer studies of SPD and PDLC samples [40, 41], within a three-substrate-layer sandwich structure (TSLSS), and to black coating paints used in solar thermal collectors [42]. That approach enforced a three-extinction matching requirement ($3\epsilon\text{MR}$) [38, 39], enabling thickness-gradient plots (TGP) even in samples approximated with fewer layers.

For the present WO_3/NiO ECDs, the seven-layer sandwich structure was simplified into a single substrate layer sandwich structure including the front and rear glass substrates, and an internal composite layer that includes the transparent conductor, electrolyte, and WO_3/NiO active films. Future work will aim to increase the number of modeled layers to



refine these approximations and to implement the directed IJ-method instead of the non-directed version used in the current analysis. A recent study applied the TSLSS configuration and a novel procedure—previously used to enforce the $3\epsilon\text{MR}$ in SPD and PDLC samples [43]—to the four inorganic ECDs analyzed in this work [44]. However, it would be more informative to extend this analysis from three to seven layers, allowing separate evaluation of the WO_3 and NiO active films while explicitly considering the FTO [8] and electrolyte [38, 39] contributions. For this purpose, the spectral limit of the optical behavior between film and substrate (SLOBFS) is currently under investigation in WO_3 -FTO-glass and NiO-FTO-glass three-layer samples with three different WO_3 thicknesses—single, double, and quadruple. These samples are analyzed only in the BOOS, since for the COOS they must be assembled as complete ECDs. Nevertheless, some insights for the COOS of these WO_3 -FTO-glass and NiO-FTO-glass configurations may be inferred from Fig. 4 of the present work. The SLOBFS are hypothesized to occur at shorter wavelengths for the interfaces between WO_3 and FTO (for both single and double WO_3 layers) and between NiO and FTO, corresponding to a transition from substrate-substrate-substrate (SSS) to film-substrate-substrate (FSS) configurations. Subsequently, the SLOBFS between FTO and glass—previously observed at around 1200 nm, approximately three times the FTO layer thickness— would correspond to a transition from FSS to film-film-substrate (FFS) configurations. Finally, for the quadruple WO_3 layer, two further transitions, first from SSS to substrate-film-substrate (SFS) configuration (at 1200 nm, corresponding to the SLOBFS of FTO of 400 nm), and then from SFS to FFS configuration (at 1440 nm, corresponding to the SLOBFS of FTO of 400 nm), was preliminarily observed [45].

For future work, the determination of the optical constants and the intrinsic and extrinsic S&A-C of the individual WO_3 and NiO electrochromic layers in their bleached and colored optical states (BOOS and COOS) would require new measurements on additional ECD samples. This is necessary because, due to the non-symmetrical sandwich structure (G-FTO- WO_3 -E-NiO-FTO-G), the optical characterization must be performed in both orientations, i.e., also in the reversed configuration (G-FTO-NiO-E- WO_3 -FTO-G). As the primary electrochromic material, WO_3 can be combined not only with NiO but also with other complementary electrochromic materials [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58]. Consequently, the parameters obtained from the three pairs of governing differential equations—namely, the four-flux formulation in the 4FM, which provides the OCs and the intrinsic S&A-C, and the two-flux formulation in the 2FM, which yields the extrinsic S&A-C—can be analyzed not only for the WO_3 /NiO system, but also for WO_3 coupled with other counter-electrode electrochromic materials employed in the fabrication of ECDs. In addition, the 400 nm thick FTO transparent conductive layer used in the present samples could be replaced by layers with different thicknesses or prepared using alternative deposition techniques, or even substituted by ITO or other transparent conductive materials [59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. In addition to the procedure based on the new equations for the intrinsic 4FM and extrinsic 2FM S&A-C described in previous works [38, 39, 40, 41, 42, 43, 44], alternative methodologies could also be implemented in order to compare and validate the results [66 - 108].

APPENDIX: NOMENCLATURE

Greek symbols

α	intrinsic scattering coefficients
β	intrinsic absorption coefficients
δ	z coordinate at front interface
ε	extinction coefficient
κ	imaginary part of refractive index
λ	wavelength
θ_c	critical angle for total internal reflection
ω	interface reflectance

English symbols

0	z coordinate at back interface
2FM	two-flux model
3 ε MR	three extinction matching requirement
4FM	four-flux model
ACP	average crossing parameter
BOOS	bleached-off optical state
COOS	colored-on optical state
cc	collimated-collimated
cd	collimated-diffuse
ECD	electrochromic device
FSR	forward scattering ratio
fb	feedback
FSS	film-substrate-substrate
FFS	film-film-substrate
FTO	fluorine-doped tin oxide
i	forward light flux
i^0	forward light flux at the back interface
i^δ	forward light flux at the front interface
i_c	collimated forward light flux
i_c^0	collimated forward light flux at the back interface
i_c^δ	collimated forward light flux at the front interface
i_d^0	diffuse forward light flux at the back interface
i_d^δ	diffuse forward light flux at the front interface
ITO	tin-doped indium oxide
IJ	forward light flux-backward light flux
j	backward light flux
j^0	backward light flux at the back interface
j^δ	backward light flux at the front interface
j_c	collimated backward light flux at the front interface



j_c^0	collimated backward light flux at the back interface
j_c^δ	collimated backward light flux
j_d^0	diffuse backward light flux at the back interface
j_d^δ	diffuse backward light flux at the front interface
K	extrinsic absorption coefficient
KM	Kubelka-Munk
MLG	Maheu-Letoulozan-Gouesbet
n	real part of refractive index
\tilde{n}	complex refractive index
NiO	nickel oxide
OC	optical constants
PDLC	polymer dispersed liquid crystal
q	diffuse fraction of light
q_0^i	diffuse fraction of the forward light at the back interface
q_0^j	diffuse fraction of backward light at the front interface
R	reflectance
R_b	reflectance at the bleached-off optical state
R_c	reflectance at the colored-on optical state
r_c	collimated interface reflectance
r_d	diffuse interface reflectance
r_d^e	external diffuse interface reflectance
r_d^i	internal diffuse interface reflectance
R_{spe}	measured specular reflectance
R_{cc}	calculated specular reflectance
R_{dif}	measured diffuse reflectance
R_{cd}	calculated diffuse reflectance
R_t	calculated total reflectance
R_{tot}	measured total reflectance
RT	reflectance-transmittance
S	extrinsic scattering coefficient
SFS	substrate-film-substrate
SSS	substrate-substrate-substrate
SWR	solar wavelength range
SLOBFS	spectral limit of the optical behavior between film and substrate
S&A-C	scattering and absorption coefficients
SPD	suspended particle device
T	transmittance
T_b	transmittance at the bleached-off optical state
T_c	transmittance at the colored-on optical state
T_{cc}	calculated specular transmittance
T_{reg}	measured regular transmittance



T_{cd}	calculated diffuse transmittance
T_{dif}	measured diffuse transmittance
T_t	calculated total transmittance
T_{tot}	measured total transmittance
TGP	thickness gradient plots
TSLSS	three-substrate layer sandwich structure
VWR	visible wavelength range
WO_3	tungsten oxide

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to the Laboratory for Spectroscopy of Materials of the National Institute of Chemistry of Ljubljana, Slovenia, for providing the four ECD samples and the measurement equipment (Perkin Elmer Lambda 950 spectrometer), and to the mobility grants of Universidad Carlos III de Madrid for supporting research in Slovenia.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

David Barrios carried out the measurements and wrote the manuscript; David Barrios and Carlos Alvarez performed 3D figures; David Barrios and Jose Miguitama found the key reference for computing properly the diffuse interface reflectance; David Barrios and Fabrizio Armando Lopez-Vargas determined the colorimetric results.

AI STATEMENT

No AI tools were used for scientific content generation, data analysis, or interpretation. All scientific results, analysis, and conclusions are the sole responsibility of the authors.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

Data are available upon reasonable request to the corresponding author (in exceptional cases).

CONFLICT OF INTEREST

Authors declare that they have no conflicts of interest in this research.

REFERENCES

- [1] Granqvist, C. G. (1995). *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*, Elsevier, Amsterdam. (Figure 1.2, in page 4).
- [2] Niklasson, G. A. and Granqvist, C. G. (2007). Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these. *Journal of Materials Chemistry* 17(2), 127-56.
- [3] Zhang, J., Tu, J.P., Xia, X. H., Qiao, Y. and Lu, Y. (2009). An all-solid-state electrochromic device based on NiO/WO_3 complementary structure and solid hybrid polyelectrolyte. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 93, 1840-1845. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.025>
- [4] Barrios, D. and Alvarez, C. (2023). Spectral voltage contour plots of optical constants and interface parameters of the active layer of a multilayer structure suspended particle device smart window from clear on to dark off states. *Orbital: Electron. J. Chem.*, 15(1), 8-20. <https://doi.org/10.17807/orbital.v15i1.16470>
- [5] Mihelčič, M., Švegl, F., Jerman, I., Orel, B. and Barrios, D. (2012). NiO pigmented coatings and NiO based inorganic EC devices. Innoshade meeting (Paris, 6-2-2012)
- [6] Mihelčič, M., Jerman, I., Švegl, F., Šurca Vuk, A., Slemenik Perše, L., Kovač, J., Orel, B. and Posset, U. (2012). Electrochromic Ni^{1-x}O pigment coatings and plastic film-based $\text{Ni}^{1-x}\text{O}/\text{TiO}_2$ device with transmissive light modulation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 107, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.08.012>
- [7] Barrios, D. (2024). Optical constants and thickness gradients for light intensities in glass substrate layers and for complex electric fields in indium tin oxide (ITO) transparent conductor thin film layer, using Bode and Nyquist wavelength-dependent diagrams. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2796, 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2796/1/012019>
- [8] Barrios, D. (2025). Spectral limit of the optical behavior between film and substrate for a fluorine-doped tin oxide (FTO) transparent conductive layer, *Journal of Optics and Photonics Research*. <https://doi.org/10.47852/bonviewJOPR52025408>
- [9] Born, M., and Wolf, E. (1970). Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light (4th Rev. ed.). UK: Pergamon Press.
- [10] Knittel, Z. (1976). Optics of thin films: An optical multilayer theory. UK: Wiley.
- [11] Pfrommer P., Lomas K.J., Seale C., and Kupke C. (1995). The radiation transfer through coated and tinted glazing. *Solar Energy*, 54: 287-299. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)00132-W](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)00132-W)
- [12] Harbecke B. (1986). Coherent and incoherent reflection and transmission of multi-layer structures. *Appl. Phys.* B39: 165-170. <https://doi.org/10.1007/BF00697414>
- [13] Barrios, D., Alvarez, C., Miguitama, J., Gallego, D. and Niklasson, G.A. (2019). Inversion of two-flux and four-flux radiative transfer models for determining scattering and absorption coefficients for a suspended particle device. *Applied Optics*, 58 (31), 8871-8881. <https://doi.org/10.1364/AO.58.008871>
- [14] Barrios, D., Alvarez, C., Miguitama, J., Wang, J. and Niklasson, G.A. (2022). Light scattering parameters of polymer dispersed liquid crystals obtained by inversion of experimental data. *Conference: Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering*, ed. by Thomas Wriedt, p. 8-11.
- [15] Barrios, D., Alvarez, C., Miguitama, J. and Velez, J. (2024). Inversion of two flux and four flux radiative transfer models for determining scattering and absorption coefficients for polymer dispersed liquid crystals. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 16(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v16i1.3146>
- [16] Kubelka, P. (1948). New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I. *J. Opt. Soc. Am.*, 38, 448-457 <https://doi.org/10.1364/JOSA.38.000448>
- [17] Saunderson, J. L. (1942). Calculation of the color of pigmented plastics. *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 727-736. <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000727>
- [18] Maheu, B. and Gouesbet, G. (1986). Four-flux models to solve the scattering transfer equation: special cases. *Applied Optics*, 25, 1122-1128. <https://doi.org/10.1364/ao.25.001122>
- [19] Levinson, R., Berdahl, P., and Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments— Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 89, 319-349. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.012>



- [20] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-Pena, J. M., Granqvist, C. G. and Niklasson, G. A. (2013). Toward a quantitative model for suspended particle devices: optical scattering and absorption coefficients. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 111, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.12.012>
- [21] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-Pena, J. M., Garcia-Camara, B., Granqvist, C. G. and Niklasson, G. A. (2015). Simulation of the thickness dependence of the optical properties of suspended particle devices. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 143, 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.044>
- [22] Kottler, F. (1960). Turbid Media with Plane-Parallel Surfaces. *J. Opt. Soc. Am.* 50 (5) 483-490. <https://doi.org/10.1364/JOSA.50.000483>
- [23] Kortüm, G. (1969). Reflectance Spectroscopy: Principles, Methods, Applications. *Springer, New York, USA*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-88071-1>
- [24] Judd, D. B. (1942). Fresnel reflection of diffusely incident light. *J. Research NBS*, 29, 329-332. <https://doi.org/10.6028/jres.029.017>
- [25] Walsh, J. W. T. (1926). The reflection factor of a polished glass surface for diffused light. *Dept. Sci. Ind. Res. (Brit.), Illumination Research Tech. Pap.* 2, 10.
- [26] Maheu, B., Letoulouzan, J.N., and Gouesbet, G. (1984). Four-flux models to solve the scattering transfer equation in terms of Lorenz-Mie parameters. *Applied Optics*, 23, 3353-3362. <https://doi.org/10.1364/AO.23.003353>
- [27] Barrios, D. (2016). Radiometry of a suspended particle device smart window. *III Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad (CITIS), Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador*.
- [28] Barrios D. and Alvarez, C. (2017). Complex refractive index Snell-Descartes law in four-flux and two-flux models for suspended particle device smart Windows. *IV Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad (CITIS), Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador*.
- [29] Barrios, D. (2017). Radiometry based average crossing parameter of four flux model in a suspended particle device. *I Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería (CICI), Universidad Tecnológica Equinoccial, Santo Domingo, Ecuador*.
- [30] Vargas, W. E. (1999). Two-flux radiative transfer model under nonisotropic propagating diffuse radiation. *Applied Optics*, 38, 1077-1085. <https://doi.org/10.1364/ao.38.001077>
- [31] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-Pena, J. M., Mihelcic, M. and Orel, B. (2012). Decoupling scattering and absorption coefficients of internal color active layers of an inorganic WO_3 and NiO based electrochromic device at bleached and colored states. *IME'10: International Meeting on Electrochromism, Holland - Michigan, USA*.
- [32] Niklasson, G.A., Wang, J. and Vargas, W.E. (2022). Inversion of light scattering experiments by using the four-flux theory. In Thomas Wriedt (Ed.). *Conference: Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering*, ed. by Thomas Wriedt, p. 40-43. <https://scattport.org/index.php/conferences-menu/715-bremen-zoom-workshop-on-light-scattering-2022>
- [33] Barrios, D. (2012). Characterization and applications of new electrochromic devices: comparison with other electrically controllable transmittance technologies. *Ph.D. thesis, Universidad Carlos III de Madrid, Spain*.
- [34] HunterLab, "XYZ - CIE Tristimulus Values", *Insight on Color* 8 (1) 1996.
- [35] HunterLab, "Yxy CIE Chromaticity Coordinates", *Insight on Color* 8 (2) 1996.
- [36] Bohren, C. F. & Huffman, D. R. (1983). Absorption and scattering of light by small particles. Wiley.
- [37] Beasley, K., Atkins, J. T., and Billmeyer Jr, F. W. (1967). Scattering and absorption of light in turbid media. *Electromagnetic Scattering*, R. L. Rowell and R. S. Stein, Gordon and Breach, New York.
- [38] Barrios, D. (2023). Forward scattering ratios, average crossing parameters and scattering and absorption coefficients new expressions using diffuse differential equations of four flux model. *Conference: Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering*, ed. by Thomas Wriedt, 6-9. <https://scattport.org/index.php/programs-menu/multiple-particle-scattering-menu/739-scattering-workshop-2023>
- [39] Barrios, D. (2024). Intrinsic and extrinsic scattering and absorption coefficients new equations in four-flux and two-flux models used for determining light intensity gradients. *Journal of Optics and Photonics Research*, 1(3), <http://dx.doi.org/10.47852/bonviewJOPR42022261>

- [40] Barrios, D. (2023). Parameters of differential equations in four-flux models approximated for multilayers samples showing scattering and absorption. *XX ELS Electromagnetic and Light Scattering Conference Almuñécar, Spain*.
- [41] Barrios, D. (2023). Parameters of differential equations in two-flux models approximated for multilayers samples showing scattering and absorption. *XX ELS Electromagnetic and Light Scattering Conference Almuñécar, Spain*.
- [42] Barrios, D. (2024). Parameters of differential equations in four-flux and two-flux models approximated for scattering and absorption results on solar thermal collector black paints. *Journal of Physics: Conference Series*, 2796, 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2796/1/012018>
- [43] Barrios, D. (2025). New procedure of intrinsic scattering and absorption coefficients in four-flux model for a suspended particle device and a polymer dispersed liquid crystal. *Optics Communications*, 582, 131594 <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2025.131594>
- [44] Barrios, D. (2025). Parameters of differential equations in four-flux and two-flux models approximated for WO_3 -NiO inorganic electrochromic devices. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2025.109718>
- [45] Barrios, D. (under review, 2026). Film and substrate spectral optical behaviors of a tungsten trioxide (WO_3) thin layer deposited on fluorine-doped tin oxide (FTO) coated glass, *Journal of Optics and Photonics Research*.
- [46] Tan, F., Zhou, J., Guo, Z., Zhang, C., Yu, S., Yang, Y., Xie, Y., Cao, X., Wu, X. and Gao, X. (2025). Research progress on electrochromic properties of WO_3 thin films. *Coatings*, 15(11), 1310. <https://doi.org/10.3390/coatings15111310>
- [47] Mak, A. K., Tuna, Ö., Sezgin, N., Üstün, A. M., Yılmaz, Ş., Öztürk and Karabulut, M. (2022). Effect of Al doping on the electrochromic properties of WO_3 thin films. *Thin Solid Films*, 751, 139241. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139241>
- [48] Krüger, L.U., Cholant, C.M., Rodrigues, M.P., Gomez, J.A., Landarin, D. M., Lucio, C.S., Lopes, D.F., Bulhões, L.O.S. and Avellaneda, C.O. (2022). Photochromism of doped and undoped WO_3 sol-gel films. *Optical Materials*, 128, 112357. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112357>
- [49] Chen, H., Zhang, L., Guo, P., Zhao, M., Chen, Z. and Ma, H. (2023). Enhanced electrochromic and mechanical properties of WO_3 film by substrate effect. *Surfaces and Interfaces*, 41, 103119. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103119>
- [50] Song, K., Weng, S., Zhou, J., Jiang, R., Cao, H. and Zhang, H. (2023). Tunable optical constants of aluminum tungsten bronzes in electrochromic WO_3 thin films. *Journal of Physical Chemistry C*, 127, 18036–18042. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c03521>
- [51] Zehra Nur Ozer, Mehmet Ozkan, Suat Pat. (2024). Investigation of the microstructural, surface, and optical properties of WO_3 -doped ZnO thin films. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, Part 1, 113301. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113301>
- [52] Zheng, J.Y., Sun, Q., Yang, H., Yu, S., Li, M., Yu, X., Wang, C., Liu, T. and Li, S. (2024). Amorphous bismuth and GO co-doped WO_3 electrochromic film with fast-switching time and long-term stability. *Dalton Transactions*, 53(6):2460-2464. <https://doi.org/10.1039/D3DT03805J>
- [53] Wang, Z., Liu, G., Li, C., Qiao, M., Tian, M., Lin, X., Cui, W., Wang, X., Liu, J., and Xu, S. (2025). $\text{W/WO}_3/\text{TiO}_2$ Multilayer film with elevated electrochromic and capacitive properties. *Materials*, 18(1), 161. <https://doi.org/10.3390/ma18010161>
- [54] Nakrela, A., Nehal, M. Elf, Bouzidi, A., Miloua, R., Medles, M., Khadraoui, M. and Desfeux, R. (2025). Comprehensive investigation of WO_3 thin films: structural, optical, and electrical insights. *Ceramics International*, 51, 16997–17006. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.02.009>
- [55] Nie, S., Lian, Y., Han, H., Zhao, L. and Liu, Z. (2025). Efficient Electrochromic Electrode Materials Based on $\text{WO}_3/\text{Ni}(\text{OH})_2$ with Dual Ion Implantation Modulability and Energy Level Matching. *Advanced Materials Technologies*, 10(9), 2401295. <https://doi.org/10.1002/admt.202401295>
- [56] Kwon, S. J., Rajesh, J. A., Kang, S. H. and Ahn, K. S. (2026). Electrochemical and optical characterization of WO_3 films synthesized by pulse current method and their application in electrochromic devices. *Electrochimica Acta*, 549, 148076. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.148076>
- [57] Sharma, R., Nihal, Sharma, M., and Goswamy, J.K. (2026). Investigation of electrochromic properties of $\text{MoSe}_2/\text{WO}_3$ nanocomposite. (2026). *Materials Letters*, 406, 139968. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.139968>

- [58] Adnan, M., Jamil, M., Ramzan, B., Hussain, T., Afaq, A. and Ghani, M. (2024). Determination of the optical properties of tungsten trioxide thin film using the transfer matrix method. *Indian Journal of Physics*, 99(5), 1645–1649. <https://doi.org/10.1039/D3DT03805J>
- [59] Ramírez-Amador, R., Alvarado-Pulido, J. J., Martínez-Hernández, H. P., Cortes-Maldonado, R., Alcántara-Iniesta, S., Flores-Carrasco, G., Ojeda-Durán, E., Malik, O., Morales-de la Garza, L. and Méndez-Rojas, M. A. (2023). Study of fluorine-doped tin oxide thin films deposited by pneumatic spray pyrolysis and ultrasonic spray pyrolysis: A direct comparison. *Materials Research Express*, 10(6), 066402. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acda1a>
- [60] Thomas, R., Mathavan, T., Ganesh, V., Yahia, I. S., Zahran, H. Y., Alfiaty, S., and Kathalingam, A. (2020). Investigation of erbium co-doping on fluorine doped tin oxide via nebulizer spray pyrolysis for optoelectronic applications. *Optical and Quantum Electronics*, 52(5), 248. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02376-8>
- [61] Isoe, W. M., Mageto, M. J., Maghanga, C. M., Mwamburi, M. M., and Odari, B. V. (2023). Optical modelling of TCO based FTO/TiO₂ multilayer thin films and simulation in hydrogenated amorphous silicon solar cell. *Scientific African*, 20, e01678. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01678>
- [62] Toral-López, A., Pérez, M. M., Rodríguez-Águila, A. B., Cardona, J. C., Ionescu, A. M., and Godoy, A. (2023). Investigation of the optical properties of indium tin oxide thin films by double integration sphere combined with the numerical IAD method. *Materials*, 16(4), 1425. <https://doi.org/10.3390/ma16041425>
- [63] Shklyayev, A. A., Utkin, D. E., Zheng, Z., and Tsarev, A. V. (2023). Redirecting incident light with Mie resonance-based coatings. *Photonics*, 10(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/photonics10111286>
- [64] Stenzel, O. and Wilbrandt, S. (2025). Theoretical aspects of thin film optical spectra: Underlying models, model restrictions and inadequacies, algorithms, and challenges. *Applied Sciences*, 15(4), 2187. <https://doi.org/10.3390/app15042187>
- [65] Dvořák, J., Vohánka, J., Buršíková, V., Franta, D. and Ohlídal, I. (2023). Optical characterization of inhomogeneous thin films deposited onto non-absorbing substrates. *Coatings*, 13(5), 873–889. <https://doi.org/10.3390/coatings13050873>
- [66] Nosidlak, N., Jaglarz, J., Vallati, A., Dulian, P., Jurzecka-Szymacha, M., Gierałtowska, S., Seweryn, A., Wachnicki, Ł., Witkowski, B. S. and Godlewski, M. (2023). The Optical Properties of Thin Film Alloys of ZnO, TiO₂ and ZrO₂ with Al₂O₃ Synthesised Using Atomic Layer Deposition. *Coatings*, 13, 1872. <https://doi.org/10.3390/coatings13111872>
- [67] Egorov, N. V., Fedorov, A. G. and Trofimov, V. V. (2024). Metody matrits perenosa i rasseyaniya dlya chislennogo opredeleniya koeffitsiyentov otrazheniya i prelomleniya tonkoplennochnykh materialov [Comparison transfer matrix methods and scattering matrix method for investigation the optical properties of multilayer structures]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 20(4), 432–445. <https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.401>
- [68] Ren, Y., Kong, D., Tan, W., Wang, J., Chen, T., Zhang, Q. and Xia, W. (2024). Simultaneous determination of the scattering and absorption coefficients of turbid media based on Mueller matrix. *Journal of Modern Optics*, 71(10–12), 354–363. <https://doi.org/10.1080/09500340.2024.2422905>
- [69] Taylor A, Parkin I, Noor N, Tummeltshammer C, Brown M. S., and Papakonstantinou I. (2013). A bioinspired solution for spectrally selective thermochromic VO₂ coated intelligent glazing. *Optic Express*, 21(S5):A750–64. <https://doi.org/10.1364/OE.21.00A750>
- [70] Oreski G, Tscharnuter D, Wallner G. M. (2010) Determination of solar optical properties of transparent polymer films using UV/vis spectroscopy. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(5), 884–91. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.01.012>
- [71] Hébert, M. and Machizaud, J. (2012). Spectral reflectance and transmittance of stacks of nonscattering films printed with halftone colors. *Journal of the Optical Society of America A*, 29(11), 2498–508. <https://doi.org/10.1364/JOSA.29.002498>
- [72] Kolokotsa, D.D., Dimitriou, V. and Synnefa, A. (2013). Modeling cool materials' Properties. *Advances in the development of cool materials for the built environment*, 195–230. <https://doi.org/10.2174/97816080547181130101>
- [73] Bayou, S., Mouzali, M., Aloui, F., Lecamp, L. and Lebaudy, P. (2013). Simulation of conversion profiles inside a thick dental material photopolymerized in the presence of nanofillers. *Polymer Journal*, 45, 863–70. <https://doi.org/10.1038/pj.2012.226>



- [74] Clark, N., Vargas, W. E., Azofeifa, D.E., Sáenz-Arce, G., Solís, H. and Ramírez-Hidalgo, G. (2014). Polycrystalline indium films in the percolation threshold regime: time correlation between electric conduction and optical properties with film morphology. *Materials Research Express*, 1(1), 016302. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/1/1/016302>
- [75] Mazauric, S., Hébert, M., Simonot, L. and Fournel, T. (2014). Two-flux transfer matrix model for predicting the reflectance and transmittance of duplex halftone prints. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(12), 2775–88. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.31.002775>
- [76] Wang, L., Eldridge, J.I. and Guo, S. M. (2014). Comparison of different models for the determination of the absorption and scattering coefficients of thermal barrier coatings. *Acta Materialia*, 64, 402–10. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.10.053>
- [77] Laaksonen, K., Li, S.-Y., Puisto, S.R., Rostedt, N.K.J., Ala-Nissila, T., Granqvist, C.G., Nieminen, R.M. and Niklasson, G.A. (2014). Nanoparticles of TiO_2 and VO_2 in dielectric media: conditions for low optical scattering, and comparison between effective medium and four-flux theories. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 132–7. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.036>
- [78] Hébert, M., Simonot, L. & Mazauric, S. (2015). Matrix method to predict the spectral reflectance of stratified surfaces including thick layers and thin films. <hal-01155614>.
- [79] Hébert, M. and Emmel, P. (2015). Two-flux and multiframe matrix models for colored surfaces. In: Kriss Mickael, editor. *Handbook of digital imaging*, 31. John Wiley & Sons 1233–77. <https://doi.org/10.1002/9781118798706.hdi055>
- [80] Van Song, T. P., Andraud, C. and Ortiz-Segovia, M.V. (2016). Towards spectral prediction of 2.5D prints for soft-proofing applications. *Sixth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IPTA.2016.7820957>
- [81] Van Song, T. P., Andraud, C. and Ortiz-Segovia, M.V. (2016). Implementation of the four-flux model for spectral and color prediction of 2.5D prints. *Proceedings IS&T Printing for Fabrication: Int'l Conf. on Digital Printing Technologies (NIP32)*. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2017.32.26>
- [82] Hébert, M., Mazauric, S. and Simonot, L. (2016). Assessing the capacity of two-flux models to predict the spectral properties of layered materials. *Proceedings IS&T Int'l. Symp. on Electronic Imaging: Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance*. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2016.9.MMRMA-369>
- [83] Simonot, L., Hersch, R. D., Hébert, M. and Mazauric, S. (2016). Multilayer four-flux matrix model accounting for directional-diffuse light transfers. *Applied Optics*, 55(1), 27–37. <https://doi.org/10.1364/AO.55.000027>
- [84] Van Song, T. P., Andraud, C. and Ortiz-Segovia, M.V. (2017). Spectral predictions of rough ink layers using a four-flux model. *Color Imaging Conference*, 25, 251–7. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-2629.2017.25.251>
- [85] Gueye, E. H. O., Tall, P. D., Talla, K., Dione, A. N., Dioum, A., Gaye, M. B., Ndiaye, N. M., Ngom, B. D. and Beye, A.C. (2017). Optical and electrical modeling of dye sensitized solar cell: influence of the overlap distance between TiO_2 particles. *American Journal of Modern Physics*, 6 (1), 1–9. <https://doi.org/10.11648/j.ajmp.20170601.11>
- [86] Tonon, C., Rozé, C., Girasole, T. and Duvignacq, C. (2017). Multilayer four-flux model for the optical degradation of thermal control coatings in space. *Proceedings 10569, International Conference on Space Optics — ICSO 2000*, 105691F. <https://doi.org/10.1117/12.2307931>
- [87] Simonot, L., Hébert, M., Mazauric, S. and Hersch, R. D. (2017). Assessing the proper color of translucent materials by an extended two-flux model from measurements based on an integrating sphere. *Proceedings IS&T Int'l Symp. on Electronic Imaging: Material Appearance*, 48–56. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.8.MAAP-291>
- [88] Slovick, B., Flom, Z., Zipp, L. and Krishnamurthy, S. (2017). Transfer matrix method for four-flux radiative transfer. *Applied Optics*, 56(21), 5890–6. <https://doi.org/10.1364/AO.56.005890>
- [89] Genty-Vincent, A., Van Song, T. P., Andraud, C. and Menu, M. (2017). Four-flux model of the light scattering in porous varnish and paint layers: towards understanding the visual appearance of altered blanched easel oil paintings. *Applied Physics A*, 123:473. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1092-1>
- [90] Gali, M. A., Gentle, A. R., Arnold, M. D. and Smith, G. B. (2017). Extending the applicability of the four-flux radiative transfer method. *Applied Optics*, 56(31), 8699–709. <https://doi.org/10.1364/AO.56.008699>
- [91] Shilpi Shital, S., Barnes, P. R. F. and Dutta, V. (2018). Analysis of four-flux parameters of TiO_2 films commonly used in DSSCs. *Solar Energy*, 173:530–8. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.095>

- [92] De la Hoz, E., Alcaraz de la Osa, R., Ortiz, D., Saiz, J. M., Moreno, F. and González, F. (2019). Physically meaningful Monte Carlo approach to the four-flux solution of a dense multilayered system. *Journal of the Optical Society of America A*, 36(2), 292–304. <https://doi.org/10.1364/JOSA.36.000292>
- [93] Duveiller, V., Gevaux, L., Clerc, R., Salomon, J. P. and Hébert, M. (2020). Reflectance and transmittance of flowable dental resin composite predicted by the two-flux model: on the importance of analyzing the effective measurement geometry. *Proceedings IS&T 28th Color and Imaging Conference*, 313–20. <https://doi.org/10.2352/issn.2169-2629.2020.28.50>
- [94] Eymard, J., Clerc, R., Duveiller, V., Commault, B. and Hébert, M. (2022). Characterization of UV–Vis–NIR optical constants of encapsulant for accurate determination of absorption and backscattering losses in photovoltaics modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 240(15), 111717. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111717>
- [95] Huang, Z., Long, L., Ye, H. and Liu, M. (2023). A modified Kubelka–Munk four–flux model for UV–vis–NIR spectral reflectance of a particle–inclusion film. *Proceedings of the 10th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-23*, 415–22. <https://doi.org/10.1615/RAD-23.610>
- [96] Mishra, B. R., Varghese, N. J. and Sasithilthlu, K. (2023). Semi-analytical technique for the design of disordered coatings with tailored optical properties. *Optic Express*, 31(6), 10201–16. <https://doi.org/10.1364/OE.484308>
- [97] Duveiller, V., Clerc, R., Eymard, J., Salomon, J. P. and Hébert, M. (2023). Performance of two-flux and four-flux models for predicting the spectral reflectance and transmittance factors of flowable dental resin composites. *Dental Materials*, 39(8), 743–55. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.06.010>
- [98] Gouesbet, G. (2024). T-matrix methods for electromagnetic structured beams: a commented reference database for the period 2019–2023. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 322:109015. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2024.109015>
- [99] Gautheron, A., Clerc, R., Duveiller, V., Simonot, L., Montcel, B. and Hébert, M. (2024). On the validity of two-flux and four-flux models for light scattering in translucent layers: angular distribution of internally reflected light at the interfaces. *Optic Express* 32(6), 9042–60. <https://doi.org/10.1364/OE.510888>
- [100] Song, X., Li, H., Gong, H., Liu, X., Zhang, M., Wang, Z., Zhou, X., Zhao, Q. and Fan, T. (2025). Machine learning prediction framework for tailoring the optical response of particulate media. *ACS Photonics*, 12(5), 2775–86. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5c00364>
- [101] Bilokur, M. and Jonsson, J. C. (2025). Comparing optical four-flux model results with experimental data obtained by integrating sphere measurements. *Applied Optics*, 64(8), 1918–23. <https://doi.org/10.1364/AO.558629>
- [102] Vargas, W. E., Wang, J. and Niklasson, G. A. (2021). Effective backscattering and absorption coefficients of light diffusing materials retrieved from reflectance and transmittance spectra of diffuse radiation. *Journal of Modern Optics*, 68(12), 605–23. <https://doi.org/10.1080/09500340.2021.1936244>
- [103] Vargas, W. E., Wang, J. and Niklasson, G. A. (2020). Scattering and absorption cross sections of light diffusing materials retrieved from reflectance and transmittance spectra of collimated radiation. *Journal of Modern Optics*, 67(11), 974–91. <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1801872>
- [104] Niklasson, G.A., Wang, J., Notfors, C., Niklasson, S.L., Strømme, M. and Århammar, C. Light scattering parameters by inversion of experimental data: the case of sunscreen lotions. (2021). *Wriedt Thomas, Eremin Yuri, editors. Conference: Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering*, 16–9.
- [105] Wang, J. and Niklasson, G. A. (2021). Extraction of light absorption and scattering coefficients of gold nanocomposites. *Wriedt Thomas, Eremin Yuri, editors. Conference: Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering*, 25–8.
- [106] Vargas, W. E. (2026). Effect of concentration, lumpiness, aggregation, and cluster compaction on optical properties of particulate media. *Optics Continuum*, 5(1), 210–234. <https://doi.org/10.1364/OPTCON.582538>
- [107] Vargas, W. E. (2026). Synthetic reflectance and transmittance spectra of particulate materials evaluated from four-flux radiative transfer models. *Optics Continuum*, 4 (9), 2130–2153. <https://doi.org/10.1364/OPTCON.569131>
- [108] Vargas, W. E. Abarca-Quesada, D. A., Wang, J. and Niklasson, G. A. (2024). Determination of intrinsic scattering and absorption coefficients of light diffusing materials: application of a spectral projected gradient method. *Journal of Modern Optics*, 71, 640–664. <https://doi.org/10.1080/09500340.2024.2448213>