

Vol. 16, Núm. 1 (2024)

# aci

avances  
en ciencias e  
ingenierías

# aci

**avances**  
en ciencias e  
ingenierías

**ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** es una revista científica multidisciplinar de acceso abierto. Publica contribuciones originales revisadas por pares en diferentes campos de las ciencias formales (e.g., matemáticas, ciencias de la computación), ciencias físicas (e.g., física, química, astronomía, geología); ciencias de la vida (e.g., biología molecular, evolución, botánica, zoología, biotecnología, paleontología), ciencias ambientales (e.g., climatología, meteorología), ciencias aplicadas e ingenierías, así como contribuciones multidisciplinares en el interfaz de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (CTIM).

#### **Editora General**

Eva O.L. Lantsoght

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y  
Delft University of Technology, Países Bajos

#### **Editores asociados**

**Elisa Bonaccorso**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Edgar Carrera Jarrín**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Dennis Cazar Ramírez**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Diego F. Cisneros-Heredia**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Mateo Dávila Jativa**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Oihane Fernandez Blanco**

investigadora independiente, Ecuador

**Sebastián Ponce**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Patricio Rojas Silva**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Gabriel Trueba Piedrahita**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Nicolás Vela-García**

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

#### **Consejo editorial**

**Andrea Arias**

DuPont Pioneer, Estados Unidos

**Carlos Ventura**

The University of British Columbia, Canadá

**César Costa**

Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

**César Iván Álvarez-Mendoza**

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

**Janio Jardán**

Universidad Tecnológica Indoamérica, Ecuador

**Johannio Marulanda Casas**

Universidad del Valle, Colombia

**John Blake**

University of Florida, Estados Unidos

**Luis Rincón**

Universidad de Los Andes, Venezuela

**Nikolay Aguirre**

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

**Nora Oleas**

Universidad Tecnológica Indoamérica, Ecuador

**Oswaldo Morales Nápoles**

Delft University of Technology, Países Bajos

**Robert Cazar**

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

**Ruth Mariela Alvarez**

Universidad de Carabobo, Venezuela

**Salvador Godoy**

Instituto Politécnico Nacional, México

**Santiago Ron**

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

**Yenisel Plasencia-Calaña**

Maastricht University, Países Bajos

## Comité científico internacional

**Gabriela Guevara**  
Universidad Técnica de Berlín, Alemania

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

**Howard Ramirez-Malule**  
Universidad del Valle, Colombia

**Patrick Venail**  
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

**Julio Valdivia-Silva**  
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

**Paula Rojas**  
Universidad Adolfo Ibáñez, Chile

**Luca Sorriso-Valvo**  
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

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

**Oliver Merchiers**  
Institut national des sciences appliquées (INSA), Francia

**Tiziano Perea**  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

**Victor Murray**  
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, Estados Unidos

## Producción editorial

USFQ PRESS

## Corrección de estilo y ortotipográfica

Reema Azar y Doménica Aroca

## Diagramación

Krushenka Bayas Ramírez

## Diseño de cubierta

Krushenka Bayas Ramírez

## Fotografía de cubierta

Freepik

## Webmaster y manejo de OJS

Scimago



Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/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.

La información presentada en esta revista es de entera responsabilidad de sus autores. USFQ PRESS presume que la información es verdadera y exacta a la fecha de publicación. Ni la editorial ni los editores ni los autores dan una garantía, expresa o implícita, con respecto a los materiales contenidos en esta obra ni de los errores u omisiones que se hayan podido realizar.

## Para correspondencia, comunicarse con:

Att. Eva Lantsoght, editora 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.ec](mailto:avances@usfq.edu.ec) - [usfqpress@usfq.edu.ec](mailto:usfqpress@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



Repositorios regionales y temáticos



Motores de búsqueda y grandes bases de datos



Servicios de apoyo a la publicación académica



Plataformas y directorios dedicados a la ciencia abierta y el acceso abierto



Recursos de archivo



Plataformas



## Contenido

Vol. 16, Núm. 1 (2024)

### Editorial

#### Preprints to Foster Open Science

#### Sección A: Ciencias Exactas y Físicas

##### **Inversión de los modelos de transferencia radiativa de dos flujos y de cuatro flujos para determinar los coeficientes de dispersión y de absorción para cristales líquidos dispersos en polímero**

Inversion of two flux and four flux radiative transfer models for determining scattering and absorption coefficients for polymer dispersed liquid crystals

David Barrios, Carlos Alvarez, Jose Miquitama, Joffre Velez

##### **Numeric simulation and experimental validation for a Novel Trapezoidal Solar Collector**

Simulación numérica y validación experimental para un Colector Solar Trapezoidal novedoso

Aien Salvo, Pablo Dellicompagni, Judith Franco, Nilsa Sarmiento

#### Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

##### **Desempeño fisiológico de semillas de sorgo dulce en respuesta a la aplicación de retardantes de crecimiento**

Physiological performance of Sweet *Sorghum* seeds in response to Growth Retardant application

Deisy Lorena Flórez-Gómez, John Freddy Rodríguez-Molina, David Napoleón Vargas-Ramírez, Luisa Fernanda Sarmiento-Moreno, Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo, Manuel Alfonso Patiño-Moscoso, Karen Viviana Osorio-Guerrero

##### **On the use of anthropogenic materials in nest building of House Wren (*Troglodytes aedon*), a report from Parque Los Algarrobos, Cumbayá, Ecuador**

El uso de material antropogénico en la construcción de nidos del Sotorrey Común (*Troglodytes aedon*), un reporte desde el Parque Los Algarrobos, Cumbayá, Ecuador

Roberto J. León-E., Ariel Guerrero-Campoverde, Mateo Dávila-Játiva

##### **Evaluación de métodos estadísticos y matemáticos para estimar datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita, Pichincha, Ecuador**

Santiago Bonilla-Cáceres, Teresa Alejandra Palacios Cabrera

Evaluation of statistical and mathematical methods to estimate missing pluviometric data in the microbasin of the Pita river, Pichincha, Ecuador

#### Sección C: Ingenierías

##### **Exploratory Study on Value Proposition Barriers for Civil Engineering Entrepreneurships - Pilot Study**

Estudio exploratorio sobre las barreras de la propuesta de valor para las empresas de Ingeniería Civil -Estudio piloto

Miguel Vélez, Mauricio Baldajos, Alejandro Toscano, Leonela Solorzano, Miguel Andrés Guerra

##### **Evaluación probabilística y económica de dos diseños de mezclas de hormigón ligero en la resistencia mecánica de mampuestos alivianados con fibras de PET triturado**

Probabilistic and economic evaluation of two designs of lightweight concrete mixes on the mechanical strength of masonry units relieved with shredded PET fibers

Kevin R. Bernal Jiménez, Wladimir A. Calvache, Jorge L. Santamaría

## **Muros de entramado ligero de madera: una revisión del estado del arte**

Light-frame wood shear walls: A review of the state-of-the-art

Jaime Encalada, Lenin Álvarez, Diego Quizanga, Luisa Viera

## **Initial study on natural fibers for use in concrete mixes as a sustainable materials alternative**

Estudio inicial sobre fibras naturales para su uso en mezclas de hormigón como alternativa de materiales sostenibles

Josué D. Batalla, Nicolás A. Hidalgo, Mateo F. Montenegro, Lourdes M. Orejuela-Escobar, Francisco Játiva, Eva O. L. Lantsoght

## **Los indicadores de desempeño de la distribución urbana de mercancías: Un análisis bibliométrico**

Performance Indicators for Urban Goods Distribution: A Bibliometric Analysis

Alejandro Molina, Cristian Gómez, Conrado Serna

## Preprints to Foster Open Science

At *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, we care deeply about open science. After all, we are an open access journal that does not impose an article processing charge, and all editors are volunteers who support open science practices. Our hosting and administrative costs are funded by Universidad San Francisco de Quito USFQ.

In a new effort to strengthen our open science practices, we have launched a Preprints server, Preprints ACI. Authors who send an article to *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* are encouraged to deposit their article as a preprint on the server. Authors from within and outside the community of Universidad San Francisco de Quito USFQ are also welcome to use our preprint server.

So, why should you consider uploading a preprint before your article is published after peer-review? In the first place, a preprint allows for direct dissemination of your findings. If you would already like to communicate your findings, or cite them, you can refer to your published preprint, which will have all its metadata correctly stored, and which will be equipped with a DOI. Similarly, if you want to start a debate based on your recent findings, sharing those findings with the research community via a preprint is good practice.

Preprints also serve to show the impact of peer review. If there is a public record of your work before and after peer review, the improvements in the work can be credited to the review process. As such, preprints are important evidence of the process of scientific publishing.

At the same time, preprint servers are always open access. Even if you plan to submit your paper to a subscription-based journal, you can consider submitting a preprint to a public server. Open access publications are important for equal access to publication, and by making your preprint publicly available, you contribute to the open access movement. Researchers from the Global South, who often may not have access to all subscription-based journals, can thus still access the research findings. Of course, if you publish with *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, your work will be published open access as well.

Ultimately, preprints contribute to the ecosystem of open science. By publishing preprints, we can accelerate the dissemination of our findings, foster an open debate with our peers, and shine a light on publications before and after peer review. All these elements contribute to more openness and collaboration within the academic community. These values are important to *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* and our mission to support open science, and we cordially invite you to use our preprint server for depositing your preprints and contributing to open science.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /  
Received:  
27/03/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
15/04/2024

## Inversión de los modelos de transferencia radiativa de dos flujos y de cuatro flujos para determinar los coeficientes de dispersión y de absorción para cristales líquidos dispersos en polímero

David Barrios<sup>1,2\*</sup>, Carlos Alvarez<sup>2</sup>, Jose Miguitama<sup>2</sup>, Joffre Velez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, Spain

<sup>2</sup> Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, Ecuador

\*Autor correspondiente/Corresponding author, email: [dbarriosp76@gmail.com](mailto:dbarriosp76@gmail.com)

## Inversion of two flux and four flux radiative transfer models for determining scattering and absorption coefficients for polymer dispersed liquid crystals

### Abstract

Intrinsic and extrinsic scattering and absorption coefficients of eight non-absorbing light polymer dispersed liquid crystals samples, with two different sizes of the active area and with four different thicknesses of the internal active layer, at their translucent off and at their transparent on optical appearance states—without and with applied electrical voltage, respectively—were successfully determined following the same procedure described in previous works with a suspended particle device—a light absorbing smart window sample—and with another commercial polymer dispersed liquid crystals smart window sample. This procedure, based on two-flux and four-flux radiative transfer models, considers the critical angle of total internal reflection for determining the internal diffuse interface reflectance and uses the same previously proposed equation for average crossing parameter, based on diffuse and total intensities of forward and backward light beams, for solving the four-flux model in order to determine intrinsic coefficients. Simulated optical appearance resulted in a milky white translucent off state and a colorless-transparent on state that becomes more transparent for polymer dispersed liquid crystals samples with thinner thicknesses, requiring higher applied voltage for the transparent on optical states of the thicker polymer dispersed liquid crystals samples characterized.

**Keywords:** average crossing parameter, four-flux model, two-flux model, scattering and absorption coefficients, polymer dispersed liquid crystals.

### Resumen

Los coeficientes intrínsecos y extrínsecos de dispersión y absorción de ocho muestras de cristales líquidos dispersos en polímero no absorbedoras de luz, con dos diferentes tamaños del área activa y con cuatro diferentes espesores de la capa interna activa, en sus estados de apariencia óptica translúcidos apagados y transparentes encendidos—sin y con voltaje eléctrico aplicado, respectivamente— fueron satisfactoriamente determinados siguiendo el mismo procedimiento descrito en trabajos anteriores



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Edgar Carrera Jarrín

Recibido /  
Received:  
28/11/2023

Aceptado /  
Accepted:  
28/02/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
13/05/2024





con un dispositivo de partículas suspendidas –una muestra de ventana inteligente absorbidora de luz– y con otra muestra de ventana inteligente de cristales líquidos dispersos en polímero. Este procedimiento, basado en los modelos de transferencia radiativa de dos flujos y de cuatro flujos, considera el ángulo crítico de reflectancia interna total para determinar la reflectancia difusa interna de interface, y utiliza la misma ecuación propuesta previamente para el parámetro de camino promedio, basada en las intensidades difusas y totales de los haces de luz hacia adelante y hacia atrás, para resolver el modelo de cuatro flujos, a fin de determinar los coeficientes intrínsecos. La apariencia óptica simulada resultó ser un estado apagado translucido blanco lechoso y un estado encendido transparente incoloro, el cuál llega a ser más transparente para las muestras de cristales líquidos dispersos en polímero con espesores más finos, requiriendo mayor voltaje aplicado para los estados ópticos encendidos transparentes de las muestras caracterizadas de cristales líquidos dispersos en polímero.

**Palabras clave:** parámetro de camino promedio, modelo de cuatro flujos, modelo de dos flujos, coeficientes de dispersión y de absorción, cristales líquidos dispersos en polímero.

## INTRODUCTION

Polymer dispersed liquid crystals (PDLC) are included within the electrically controllable chromogenic technologies, since the amount of light that passes through them can be controlled by external electric stimulation. The main application of PDLC such as smart window shows two different optical states—transparent on and translucent off—depending on the light to be transmitted through direct or diffuse, with and without applied AC voltage signal, respectively [1,2,3]. In this technology, PDLCs consist of a thin polymeric matrix layer containing liquid crystal micro drops. This mixture is placed over two transparent substrates covered with a conductive layer, usually indium tin oxide (ITO). In this work an electro-optical characterization of eight different samples of these devices fabricated on glass substrates, with different thicknesses and sizes, was carried out following the same procedure used in previous works with a suspended particle device (SPD) sample [4] and with another commercial PDLC sample [5]. The purpose of the electro-optical characterization carried out is to obtain the optical constants and the scattering and absorption coefficients of the PDLC samples, useful parameters required in order to predict the optimum thickness of the samples and the required voltage applied so the transmittance contrast is improved. Optical constants are also known as complex refractive index, i.e., the real part standing for the speed of light at the inner of the samples and the imaginary part related to the extinction of light, which is caused either by scattering or by absorption of light. The procedure consists of three steps. In the first step, optical constants ( $n$  and  $k$ ) were obtained from collimated-collimated (cc) transmittance and reflectance ( $T$  &  $R$ ) equations of Maheu, Letoulozan and Gouesbet four-flux model (MLG-4FM, [6]) by fitting to the measured collimated-collimated  $T$  &  $R$  components, i.e., regular transmittance ( $T_{reg}$ ) and specular reflectance ( $R_{spe}$ ), for the eight PDLC samples at translucent off and transparent on states, with and without an applied voltage signal, respectively. In the second step, extrinsic scattering and absorption coefficients ( $S$  and  $K$ , respectively) were obtained from Kubelka-Munk two flux model (KM-2FM, [7]), followed by the Saunderson correction [8]—in order to take the interfaces into account—by fitting to measured total  $T$  &  $R$  components ( $T_{tot}$  and



$R_{tot}$ ). Finally, in the third step, intrinsic scattering and absorption coefficients ( $\alpha$  and  $\beta$ , respectively) were obtained from collimated-diffuse (cd) T & R equations of MLG-4FM [6]. As in previous works with the SPD and the commercial PDLC samples [4,5], the previously proposed equation for average crossing parameter (ACP) was used for decoupling extinction coefficients ( $\epsilon$ ) into intrinsic scattering and absorption coefficients ( $\epsilon=\alpha+\beta$ ), by fitting forward scattering ratio (FSR) and  $\alpha$  (being  $\beta=\epsilon-\alpha$ ) to the measured diffuse T & R components ( $T_{dif}$  and  $R_{dif}$ ), using the collimated-diffuse (cd) T & R equations of MLG-4FM [6]. Here,  $\epsilon$  was determined using real and imaginary parts of refractive index ( $n$  and  $\kappa$ ) and wavelength ( $\lambda$ ), i.e.,  $\epsilon=4\pi\kappa/\lambda_n=4\pi\kappa n/\lambda$  (since  $\lambda_n=\lambda/n$  due to compression of light wavelength inside of the samples with respect to outside air).

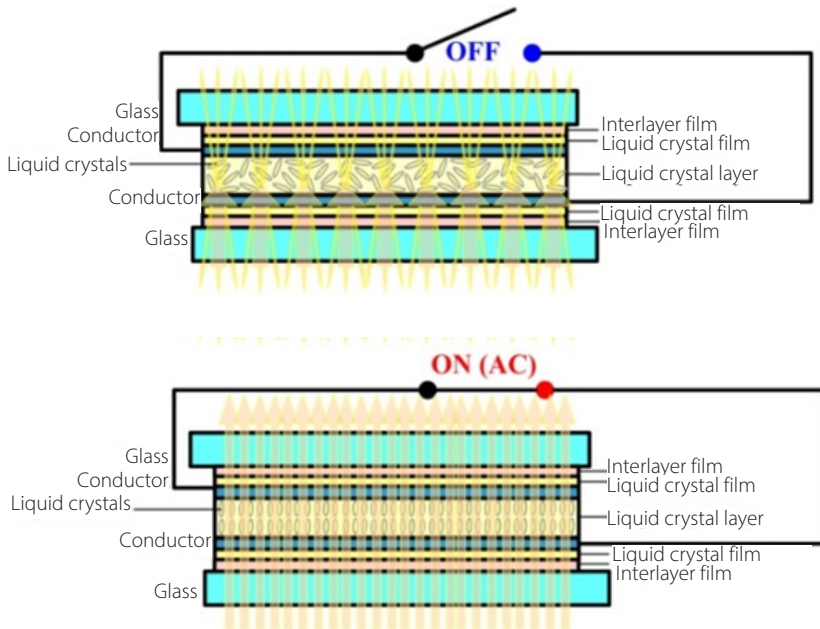
For obtaining both extrinsic and intrinsic coefficients, the internal diffuse interface reflectance ( $r_d^i$ ) was computed using the method described by Kortum [9], i.e., integrating Fresnel reflection coefficients, for S and P light polarizations. However, the upper limit of integration used was the critical angle of total internal reflection ( $\theta_c$ ), instead of up to  $90^\circ$ , i.e., in the complete forward hemisphere, leading to the same value as for external diffuse interface reflectance ( $r_d^e$ ), such as Mac Adam suggested to Kottler [10]. In this way, instead of different external and internal diffuse interface reflectance ( $r_d^i$  and  $r_d^e$ ), as Judd [11] and Walsh [12] procedures obtained, the same value for both external and internal diffuse interface reflectances are obtained for diffuse light beams ( $r_d^i=r_d^e=r_d$ ), as it also takes place with collimated interface reflectances ( $r_c^i=r_c^e=r_c$ ). For instance, at an air-glass interface (with optical constants of glass  $n^G\approx 1.5$  and  $\kappa^G\approx 0$ ),  $r_c\approx 0.04$  and  $r_d\approx 0.09$  (values of  $r_d^i\approx 0.60$  and  $r_d^e\approx 0.09$  are obtained if integrating up to  $90^\circ$  instead of up to  $\theta_c$  [11,12]). As described in [4], before considering Mac Adam to Kottler's suggestion [10], the results of KM-2FM applied to the SPD sample obtained some fitting mistakes at the visible range for  $R_{tot}$  [13,14]. For obtaining extrinsic S and K coefficients, total interface reflectance ( $\omega$ ) at back interface (at  $z=0$ ) for forward light beam (i) and at front interface (at  $z=\delta$ ) for backward light beam (j) were calculated as required intermediate parameters ( $\omega_0^i$  and  $\omega_\delta^j$ ) by means of diffuse fractions of light ( $q$ ), as explained by Levinson [15], i.e.,  $\omega=r_c(1-q)+r_dq$ . Hence, despite the fact that KM-2FM [7] was in principle a model used with samples showing only diffuse light, Levinson [15] suggested that it can be used, in an approximated way, for samples showing total light, i.e., collimated and diffuse light, instead of only diffuse [15]. The equations for  $q_0^i$  and  $q_\delta^j$  obtained in previous works [13] were used for computing  $\omega_0^i$  and  $\omega_\delta^j$  parameters. Since at the measurement process the samples are illuminated only with collimated light beam through the front interface,  $q_\delta^i=0$  or  $i^\delta=i_c^\delta=1$  and  $j^0=j_d^0=0$  (being  $q_0^j$  not required since the sample  $j^0=j_c^0+j_d^0=0$ ). Besides, feedback ACP and FSR parameters were obtained using Vargas's relations [16] in order to validate the applicability of KM-2FM [7] with Saunderson correction [8] for non-absorbing light samples, such as PDLCs. The optical measurements of the eight PDLC samples were carried out in a previous work of the authors, where an equivalent electric circuit was proposed using electrochemical impedance spectroscopy from Bode and Nyquist impedance diagrams [17].

## MATERIALS AND METHODS

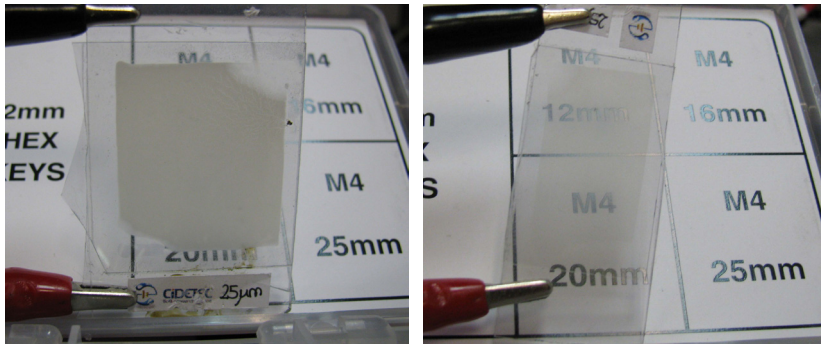
The amount and spectrum of light crossing the LC is controlled using its molecular axis orientation to turn the polarization of the incoming light. By changing the orientation

of the LC molecules placed between two conductive electrodes with the electric field, it is possible to vary the intensity of transmitted light, as is the case of switchable devices based on LC. A PDLC consists of microscopic nematic LC spheres, known as droplets, dispersed in a polymer matrix (Fig. 1). These droplets scatter incoming light resulting in a milky white appearance. LC molecules are oriented allowing light transmission instead of scattering when applying an AC voltage signal.

Eight PDLC samples over glass substrate were developed by Cidtec S.A. with two different active areas (PDLC-A samples with  $3 \times 2.7 \text{ cm}^2$  and PDLC-B samples with  $3.3 \times 1.8 \text{ cm}^2$ ) and four different internal active layer thicknesses (25, 50, 75 and  $100 \mu\text{m}$ ), following a manufacture procedure described in [18,19]. Fig. 2 shows a photograph of the PDLC 25-A sample at both translucent off and transparent on optical states. A  $24 \text{ V}_{\text{rms}}$  50 Hz sinusoidal voltage signal was used for switching the PDLC samples from translucent off to transparent on states. The optical measurements were carried out using a Perkin Elmer Lambda 900 spectrometer equipped with an integrating sphere used to collect diffuse components of transmitted and reflected light. Total and diffuse T & R components ( $T_{\text{tot}}$ ,  $R_{\text{tot}}$ ,  $T_{\text{dif}}$  and  $R_{\text{dif}}$ ) were measured in the solar wavelength range, from 250 to 2500 nm, with 5 nm steps. Collimated T & R components ( $T_{\text{reg}}$  and  $R_{\text{spe}}$ ) were obtained subtracting diffuse to total measured T & R components.



**FIGURE 1.** Sandwich structure and principle of operation of a polymer dispersed liquid crystal (PDLC) smart window at translucent off (above) and transparent on (below) optical states.



**FIGURE 2.** Photograph of PDLC 25-A sample at translucent off (left) and transparent on (right) optical states [17].

## RESULTS

The same method described in previous works for an SPD sample [4], at both dark off and clear on optical states, and for a commercial PDLC sample [5], at both translucent off and transparent on optical states, is used in this work for the eight PDLC samples characterized, of two different active areas (A and B) and four different thicknesses of the inner active layer (25, 50, 75 and 100  $\mu\text{m}$ ), at both translucent off and transparent on states. The procedure carried out for optical characterization was described in the introduction section. Optical constants are obtained in the first step from fitting measured direct T & R components to cc eq. of MLG-4FM [6] and used to determine collimated interface reflectance  $r_c$  and light extinction coefficients  $\epsilon$ . Then, extrinsic scattering and absorption coefficients (S and K) are obtained from fitting measured total T & R components using KM-2FM [7] with Saunderson correction [8] in the second step. The third step consists of obtaining intrinsic scattering and absorption coefficients ( $\alpha$  and  $\beta$ ) and FSR parameter from fitting measured diffuse T & R components to cd eq. of MLG-4FM [6] by using the fifth eq. proposed for ACP parameter. Finally, ACP and FSR obtained parameters are related using feedback Vargas's relations [16] by comparison of the intrinsic and extrinsic coefficients.

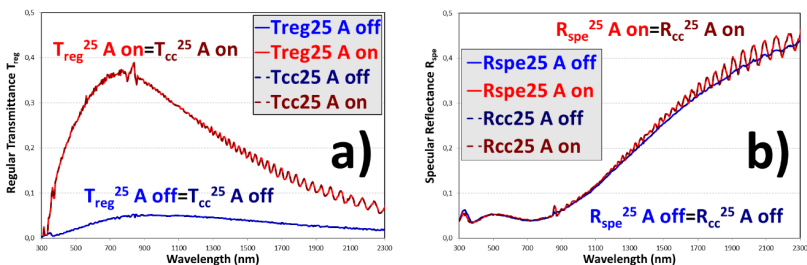
### A. Collimated Interface Reflectance and Extinction from 4FM Collimated-Collimated Measurements:

For the eight PDLC samples,  $r_c$  and  $\epsilon$  were determined using MLG-4FM [6] cc equations by fitting calculated collimated-collimated transmittance and reflectance ( $T_{cc}$  and  $R_{cc}$ )—i.e., collimated components measured when illuminating with collimated light—to the measured direct components  $T_{reg}$  and  $R_{spe}$ . Collimated T & R measurements and fittings of the PDLC 25-A sample, at translucent off and transparent on states, are detailed in Fig. 3. A perfect fitting is achieved for both optical appearances, showing a much higher contrast in  $T_{reg}$  than in  $R_{spe}$ . The oscillations observed at infrared range of wavelength only for the transparent on state for  $T_{reg}$  and  $R_{spe}$  are considered as interference effects [21]. These oscillations were also observed at the clear on state of the previously characterized SPD sample [4] and at the transparent on state of the previously characterized commercial PDLC sample [5].

Fittings and measurements of  $T_{reg}$  and  $R_{spe}$  of A and B PDLC samples in Fig. 4 show that the main contrasts between translucent off and transparent on states is observed with  $T_{reg}$  for the thinner devices, i.e., PDLC 25-A and PDLC 25-B samples. Contrasts decrease for thicker devices with the applied voltage of  $24 V_{rms}$  50 Hz sinusoidal signal. This is because the amount of voltage required for switch PDLC samples depends on the thickness, usually being around 2 to 10 V/ $\mu m$ . It should be expected that a higher amplitude voltage applied to thicker PDLC samples would result in a higher transparency for the transparent on state, as well as interference effects oscillations, which are only observed for the thinner PDLC samples at transparent on states, with the applied amplitude of 24 Vrms in a sinusoidal voltage signal. Besides, contour plots of Fig. 5 evidence the dependency of the thickness with the spectral  $T_{reg}$ , observing the same behavior of PDLC samples at both translucent off and transparent on states. However, the PDLC thickness shows independency for  $R_{spe}$  due to the almost vertical fringes of contour plots for both A and B PDLC samples.

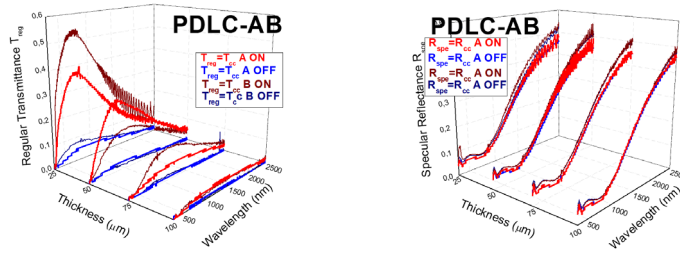
The total interface reflectance at front interface for forward light sense ( $\omega_0^i$ ) is  $r_c$  due to  $q_0^i=0$ , i.e., the samples are illuminated only with collimated light. Note that in Fig. 6 (a), since  $r_c$  is related to speed of light inside PDLC samples, this speed for translucent off and for transparent on states is almost the same, being higher for shorter wavelengths, corresponding to the visible range. The speed decreases for near infrared wavelength range, where  $r_c$  increases. On the other hand, the extinction  $\epsilon$  of light (by scattering or absorption) of Fig. 6 (b) is lower for transparent on state than for translucent off state for PDLC 25-A sample.

Unlike the independent behavior of  $r_c$  with thickness and with applied voltage observed in Fig. 7 (left) and in contour plots of Fig. 8 (left) for both A and B PDLC samples,  $\epsilon$  shows a dependent behavior of both thickness and applied voltage, showing a lower value for thinner devices at transparent on states. In principle,  $\epsilon$  should show independency of thickness at translucent off states, since A and B PDLC samples were manufactured using the same material for the inner active layer. So, the discrepancies observed in Fig. 7 (right) for translucent off states should be related to the monolayer assumption—i.e., computations were carried out neglecting multilayer sandwich structure of PDLC samples, structure including thick glass substrate and transparent conductor thin film layers. Colorbar of contour plots of A and B PDLC samples at translucent off states in Fig. 8 (right) show closer values than at transparent on states. This indicates that the voltage level applied to PDLC samples of different thicknesses is related to the amount of light that is directly transmitted.

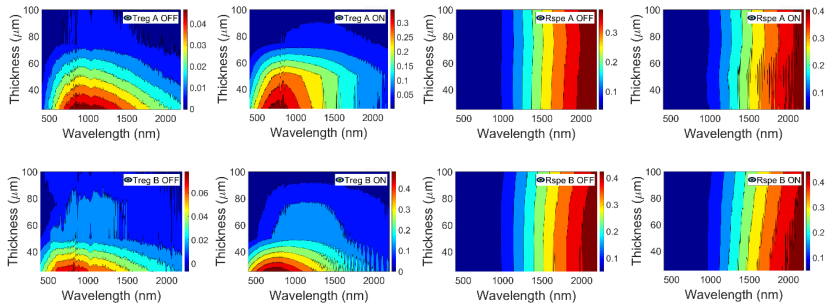


**FIGURE 3.** Regular transmittance  $T_{reg}$  (a) and specular reflectance  $R_{spe}$  (b) of the PDLC 25-A sample, with fits to the collimated-collimated equations of the four-flux model ( $T_{cc}$  and  $R_{cc}$ ).

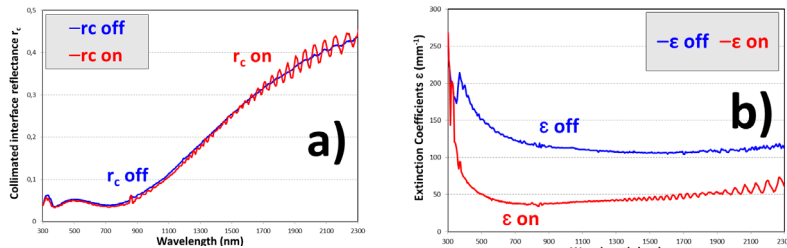




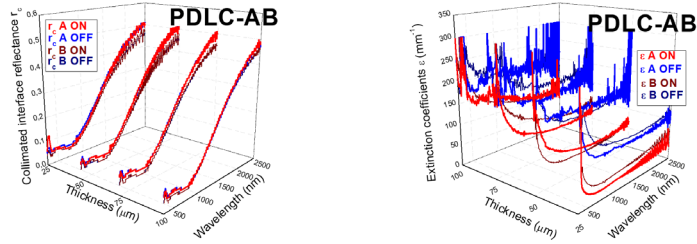
**FIGURE 4.** Regular transmittance  $T_{reg}$  (left) and specular reflectance  $R_{spe}$  (right) for A and B PDLC samples, with fits to the collimated-collimated equations of the four-flux model  $T_{cc}$  and  $R_{cc}$ .



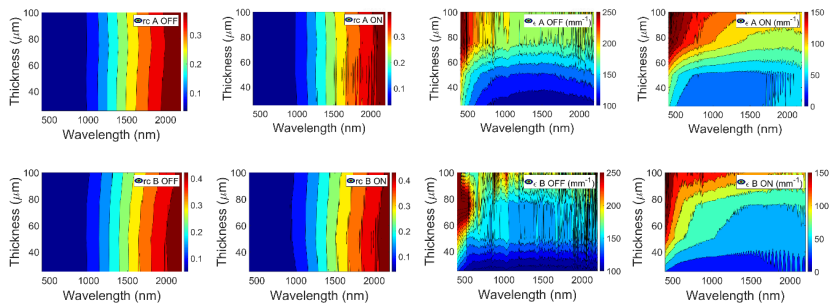
**FIGURE 5.** Regular transmittance  $T_{reg}$  (left) and specular reflectance  $R_{spe}$  (right) contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.



**FIGURE 6.** Collimated interface reflectance  $r_c$  (a) and light extinction coefficients  $\epsilon$  (b) of the PDLC 25-A sample.



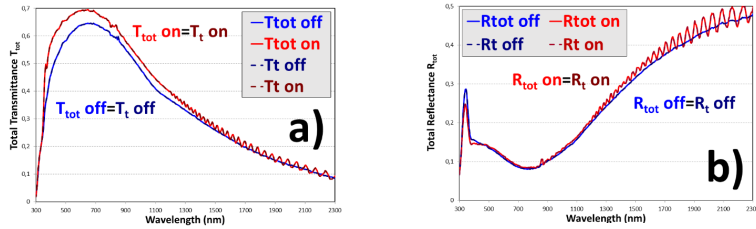
**FIGURE 7.** Collimated interface reflectance  $r_c$  (left) and light extinction  $\epsilon$  coefficients (right) for A and B PDLC samples.



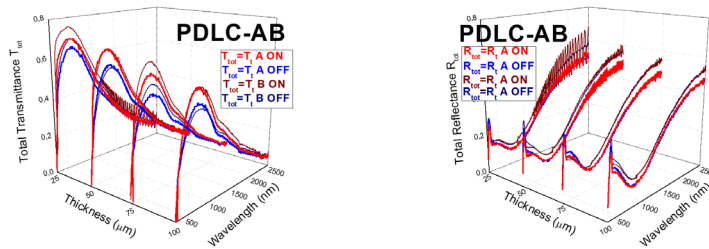
**FIGURE 8.** Collimated interface reflectance  $r_c$  (left) and light extinction  $\epsilon$  (right) contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.

## B. Extensive 2FM Scattering and Absorption Coefficients from Measurements of Total Transmittance and Reflectance

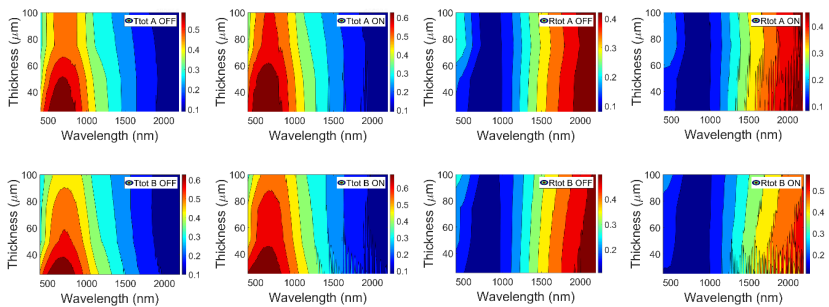
Extrinsic scattering and absorption coefficients ( $S$  and  $K$ , respectively) for the eight PDLC samples were determined by using hyperbolic equations of KM-2FM [7] together with Saunderson correction [8] in order to take the interfaces into account by fitting the calculated total transmittance and reflectance ( $T_t$  and  $R_t$ ) to the measured total components of transmittance and reflectance ( $T_{tot}$  and  $R_{tot}$ ). Total measurements and fittings of the PDLC 25-A sample, at translucent off and transparent on states, are detailed in Fig. 9. A perfect fitting is achieved for both optical appearances. As was the case with  $T_{reg}$  and  $R_{spe}$  contrasts between translucent off and transparent on states in Fig. 3, the contrast between both optical states in  $T_{tot}$  is higher than in  $R_{tot}$ . However,  $T_{tot}$  contrast is lower than  $T_{reg}$  contrast. This is because total transmitted light of Fig. 9 (a) includes diffuse transmitted light, and PDLC technology switches transmitted light from diffuse to direct with applied voltage. Oscillations due to interference effects [21] in total measurements are only observed for the transparent on state at the same infrared wavelength range as for collimated measurements.



**FIGURE 9.** Total transmittance  $T_{tot}$  (a) and total reflectance  $R_{tot}$  (b) of the PDLC 25-A sample, with fits to the two-flux model with interface corrections  $T_t$  and  $R_t$ .



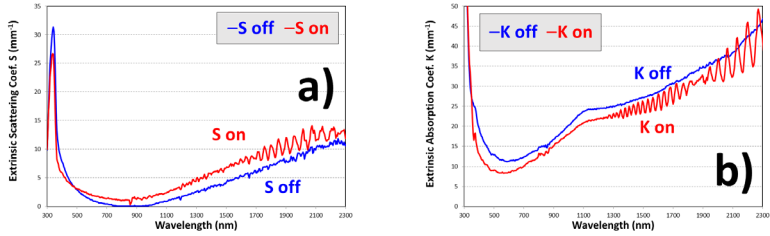
**FIGURE 10.** Total transmittance  $T_{tot}$  (left) and total reflectance  $R_{tot}$  (right) of A and B PDLC samples, with fits to the two-flux model with interface corrections  $T_t$  and  $R_t$ .



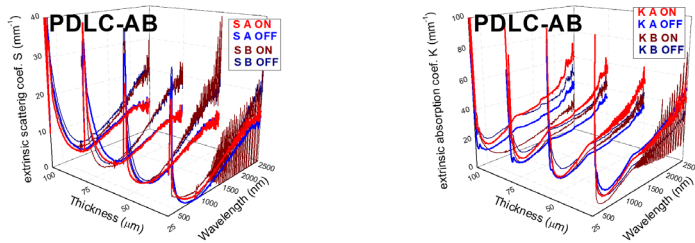
**FIGURE 11.** Total transmittance  $T_{tot}$  (left) and total reflectance  $R_{tot}$  (right) contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.

Fig. 10 (left) shows a slight decrease of  $T_{tot}$  as the thickness increases, at both translucent off and transparent on states, for A and B PDLC devices. This behavior can be also observed with contour plots of Fig. 11 (left). As with  $R_{spe}$  in Fig. 4 (right),  $R_{tot}$  in Fig. 10 (right) is almost the same for the different thicknesses for both optical states. The thickness dependencies and independencies of  $T_{tot}$  and  $R_{tot}$  respectively of Fig. 10 and Fig. 11 can be compared with the thickness dependencies and independencies of  $T_{reg}$  and  $R_{spe}$  respectively of Fig. 4 and

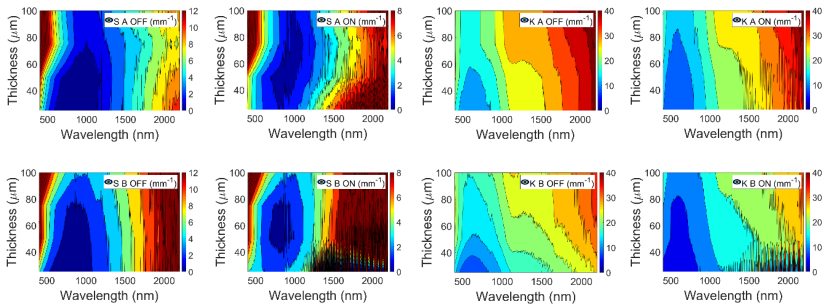
Fig. 5. Contrast between transparent on and translucent off states are lower for  $T_{tot}$  than for  $T_{reg}$  due to the fact that PDLC samples transmit almost the same amount of total light, i.e., collimated and diffuse, at both optical states. At the transparent on states,  $T_{reg}$  and transparency increase because  $T_{dif}$  and haze decrease.



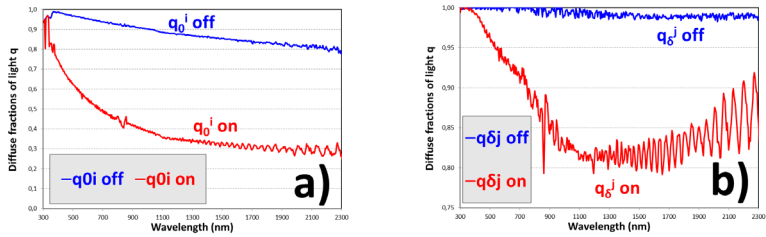
**FIGURE 12.** Extrinsic scattering  $S$  (a) and absorption  $K$  (b) coefficients of the PDLC 25-A sample derived from fits of the two-flux model with interface correction to experimental total components  $T_{tot}$  and  $R_{tot}$ .



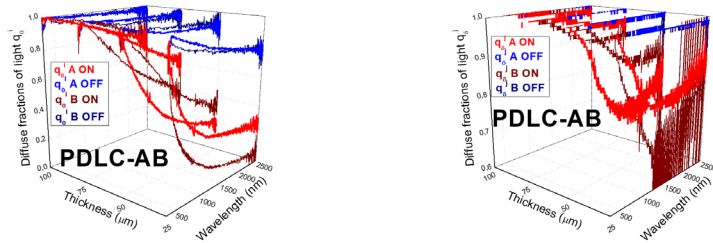
**FIGURE 13.** Extrinsic scattering  $S$  (left) and absorption  $K$  (right) coefficients obtained from fits of the two-flux model with interface correction to experimental total  $T_{tot}$  and  $R_{tot}$  components for A and B PDLC samples.



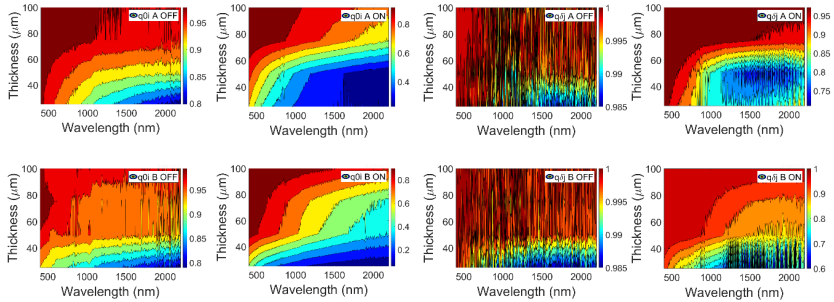
**FIGURE 14.** Extrinsic scattering  $S$  (left) and absorption  $K$  (right) coefficients contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.



**FIGURE 15.** Diffuse fractions of light of the PDLC 25-A sample at front ( $\delta$ ) interface for forward (i) light beam  $q_0^i$  (a) and at back (0) interface for backward (j) light beam  $q_0^j$  (b).



**FIGURE 16.** Diffuse fraction of light at front ( $\delta$ ) interface for forward (i) light beam  $q_0^i$  (left) and diffuse fraction of light at back (0) interface for backward (j) light beam  $q_0^j$  (right) for A and B PDLC samples.



**FIGURE 17.** Diffuse fractions of light at back (0) interface for forward (i) light beam  $q_0^i$  (left) and at front ( $\delta$ ) interface for backward (j) light beam  $q_0^j$  (right) contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.

Although Fig. 12 shows higher values for absorption  $K$  than for scattering  $S$  extrinsic coefficients for PDLC 25-A sample, and also a bit higher value of  $S$  for transparent on state than for translucent off state, this strange behavior could be due to the approximation suggested in [15] of using KM-2FM [7] with Saunderson correction [8] for samples showing not only diffuse but total  $T$  &  $R$  components, including collimated and diffuse instead of only diffuse. Higher values for  $K$  than for  $S$  are also observed in Fig. 13 and Fig. 14, showing a bit higher value of  $S$  for transparent on states and of  $K$  for translucent off states.



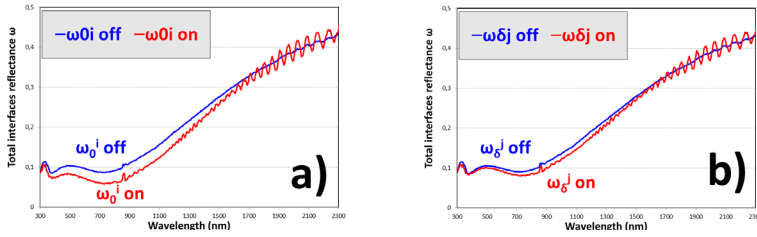


FIGURE 18. Total interface reflectance of the PDLC 25-A sample at front ( $\delta$ ) interface for forward (i) light beam  $\omega_0^i$  (a) and at back (0) interface for backward (j) light beam  $\omega_0^j$  (b).

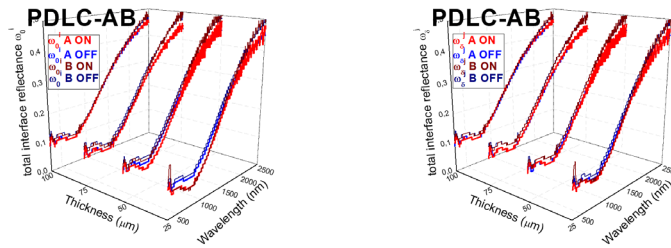


FIGURE 19. Total interface reflectance at front ( $\delta$ ) interface for forward (i) light beam  $\omega_0^i$  (left) and total interface reflectance at back (0) interface for backward (j) light beam  $\omega_0^j$  (right) for A and B PDLC samples.

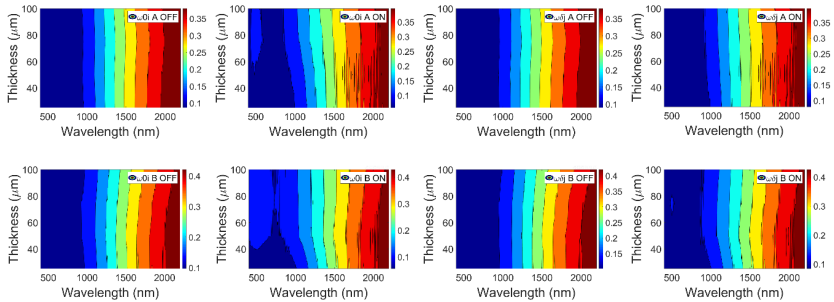


FIGURE 20. Total interface reflectance at back (0) interface for forward (i) light beam  $\omega_0^i$  (left) and at front ( $\delta$ ) interface for backward (j) light beam  $\omega_0^j$  (right) contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.

Diffuse fractions of light  $q$  are defined as the ratio of diffuse/total intensities at the interfaces. Hence,  $q_{0^i} = i_d^0 / (i_c^0 + i_d^0)$  and  $q_{\delta^j} = j_d^\delta / (j_c^\delta + j_d^\delta)$ . Since the samples are only forward illuminated through front interface,  $q_{\delta^j}$  must always be higher than  $q_{0^i}$ . As expected, both  $q_{0^i}$  and  $q_{\delta^j}$  are also higher for translucent off states than for transparent on states. Values for PDLC 25-A are observed in Fig. 15. The values obtained for the different thicknesses in Fig. 16 show higher oscillations of  $q_{\delta^j}$  than of  $q_{0^i}$  with the PDLC 25-B sample, due to the higher oscillations of  $R_{tot}$  than of  $T_{tot}$  in Fig. 10. As in previous contour plots, almost similar values for A and B PDLC samples are observed in Fig. 17.

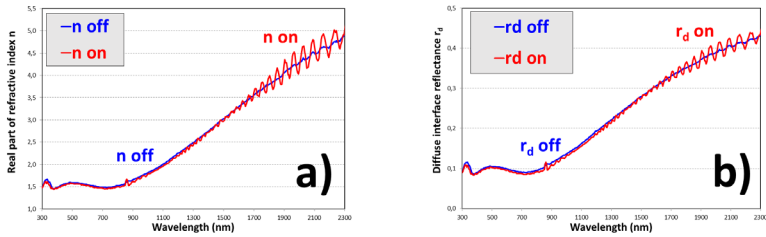


FIGURE 21. Real part of refractive index  $n$  (a) and diffuse interface reflectance  $r_d$  (b) of the PDLC 25-A sample.

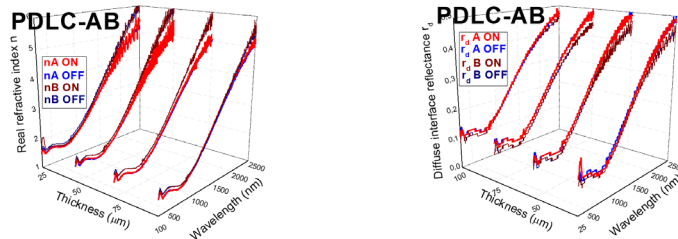


FIGURE 22. Real part of refractive index  $n$  (left) and diffuse interface reflectance  $r_d$  (right) for A and B PDLC samples.

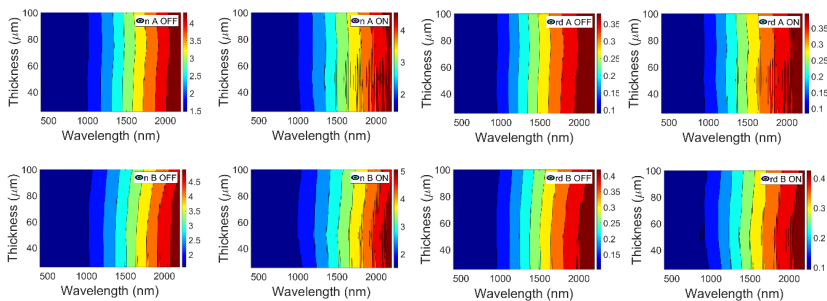


FIGURE 23. Real part of refractive index  $n$  (left) and diffuse interface reflectance  $r_d$  (right) for A (up) and B (down) PDLC samples.

Total inner interface reflectance at front and back interfaces for forward and backward light senses  $\omega_\delta^j$  and  $\omega_0^i$  show a similar behavior as  $r_c$ , i.e., total interface reflectance for forward light sense at front interface, since  $q_\delta^i=0$ . For PDLC 25-A, a bit higher difference between  $\omega_0^i$  and  $\omega_\delta^j$  is observed for transparent on state than for translucent off state in Fig. 18. Fig. 19 and Fig. 20 show the independent behavior of  $\omega_0^i$  and  $\omega_\delta^j$  with thickness and also with optical states. In the same way as with  $r_c$ ,  $\omega_0^i$  and  $\omega_\delta^j$ , Fig. 21, Fig. 22, and Fig. 23 show almost independent behavior of thickness and applied voltage for the real part of refractive index  $n$  and for diffuse interface reflectance  $r_d$ .

### C. Intrinsic 4FM Scattering and Absorption Coefficients from Measurements of Diffuse Transmittance and Reflectance:

Intrinsic scattering and absorption coefficients ( $\alpha$  and  $\beta$ , respectively) for the eight PDLC samples were determined by using the equations of MLG-4FM [6] by fitting the calculated collimated-diffuse transmittance and reflectance ( $T_{cd}$  and  $R_{cd}$ )—i.e., the diffuse component measured when illuminating with collimated light—to the measured diffuse components of transmittance and reflectance ( $T_{dif}$  and  $R_{dif}$ ).

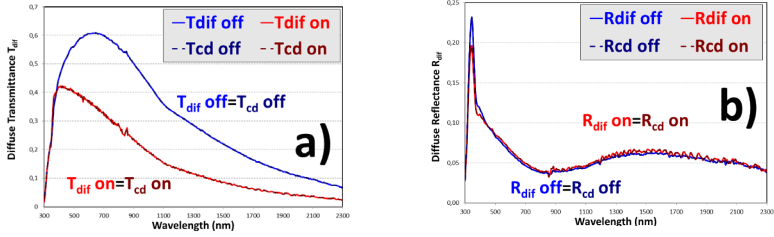
Diffuse measurements and fittings of the PDLC 25-A sample, at translucent off and transparent on states, are detailed in Fig. 9. A perfect fitting is achieved for both optical appearances. As was the case with  $T_{reg}$  and  $R_{spe}$  contrasts between translucent off and transparent on states in Fig. 3, the contrast between both optical states in  $T_{tot}$  is higher than in  $R_{tot}$ . However,  $T_{tot}$  contrast is lower than  $T_{reg}$  contrast. This is because total transmitted light includes diffuse transmitted light and PDLC technology switch transmitted light from diffuse to direct with applied voltage. Interference effects are only observed for the transparent on state at the same infrared wavelength range as for collimated measurements.

Contrary to  $T_{reg}$  in Fig. 3 (a),  $T_{dif}$  in Fig. 24 (a) shows higher values for translucent off states than for transparent on states for PDLC 25-A sample. This is in agreement with the closer values of  $T_{tot}$  in both optical states in Fig. 9 (a). On the other hand,  $R_{dif}$  shows the same independent behavior of Fig. 3(b) and Fig. 9 (b) with optical states as  $R_{spe}$  and  $R_{tot}$  in Fig. 24 (b). With higher thicknesses, Fig. 25 (left) shows how  $T_{dif}$  decreases for translucent off states and increases for transparent on states, due to the previous requirement of higher voltages applied to thicker PDLC samples, in order to increase transparency at the transparent on states. A slight increase of  $R_{dif}$  with thickness at both optical states is observed in Fig. 25 (right). Contrary to  $T_{reg}$  contour plots of Fig. 5 (left),  $T_{dif}$  contour plots of Fig. 26 (left) show higher values when increasing thickness. Fig. 5 (right) and Fig. 26 (right) show the almost independent behavior with thickness and with optical state of  $R_{spe}$  and  $R_{dif}$  respectively.

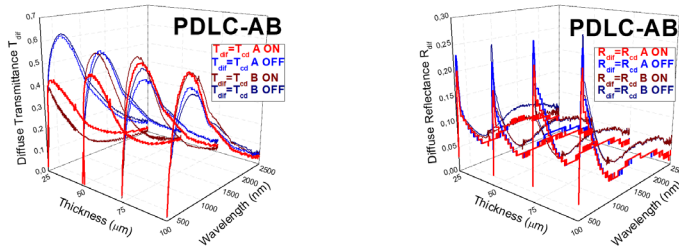
Intrinsic scattering  $\alpha$  and absorption  $\beta$  coefficients for PDLC 25-A in Fig. 27 show the expected optical behavior not observed with extrinsic S and K coefficients, approximated as indicated in [15] using total instead of only diffuse T & R components. In this way, higher values for  $\alpha$  than for  $\beta$  are observed for both optical states. The higher contrast between translucent off and transparent on states is observed for  $\alpha$ , being smaller for  $\beta$ , in agreement with the closer values of  $T_{tot}$  at both optical states, i.e., rather than absorption, scattering is mainly modulated with applied voltage in PDLC samples. This is clearly observed for the different thicknesses for  $\alpha$  in Fig. 28 (left) and for  $\beta$  in Fig. 28 (right). The higher variation with thickness occurs for  $\alpha$  at transparent on states in Fig. 29.

The procedure carried out for determining intrinsic coefficients, described in previous works [4,5], used the proposed Eq. (1) for the ACP parameter.

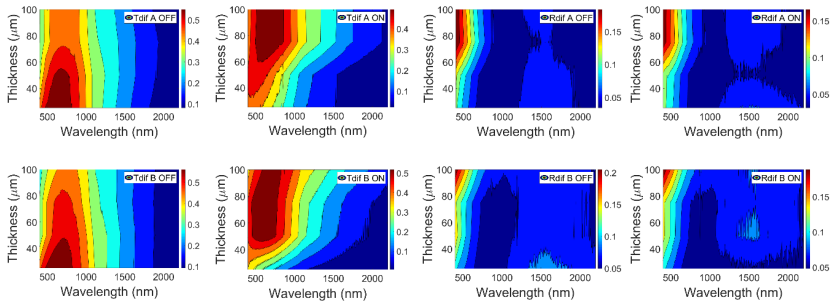
$$ACP = 1 + \frac{i_a^0 + j_a^{\delta}}{i_c^0 + i_a^0 + j_c^{\delta} + j_a^{\delta}} \quad (1)$$



**FIGURE 24.** Diffuse transmittance  $T_{dif}$  (a) and reflectance  $R_{dif}$  (b) of the PDLC 25-A sample, with fits to the collimated-diffuse eq. of the four-flux model  $T_{cd}$  and  $R_{cd}$ .



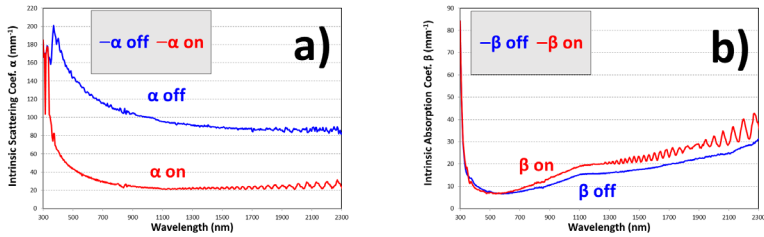
**FIGURE 25.** Diffuse transmittance  $T_{dif}$  (left) and diffuse reflectance  $R_{dif}$  (right) for A and B PDLC samples, with fits to the collimated-diffuse equations of the four-flux model  $T_{cd}$  and  $R_{cd}$ .



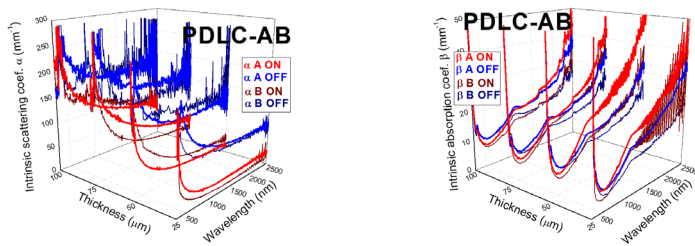
**FIGURE 26.** Diffuse transmittance  $T_{dif}$  (left) and diffuse reflectance  $R_{dif}$  (right) contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.

The ACP parameter can vary from  $ACP=1$ , for only collimated light, to  $ACP=2$ , for only diffuse light. A value of  $ACP=3^{0.5} \approx 1.732$  was used for the homogeneous clouds of Venus [22], being obtained as the main diagonal of a cube of normalized size, i.e., when light travels the same distance in the three cartesian axis, or  $(x^2+y^2+z^2)^{0.5} = 3^{0.5}$  if  $x=y=z=1$ . Feedback ACP parameter is obtained relating extrinsic  $K$  and intrinsic  $\beta$  absorption coefficients in Eq. (2) [16].

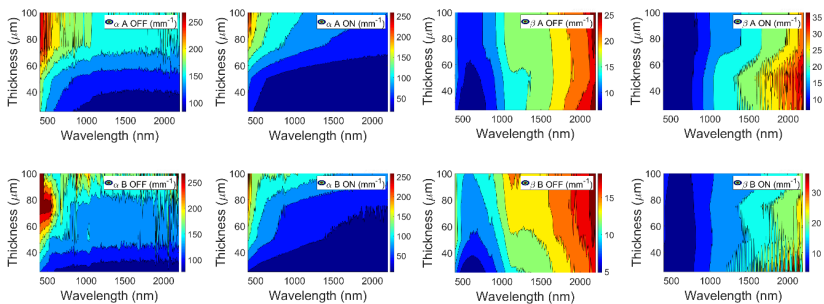
$$K = ACP_{fb} \cdot \beta \quad (2)$$



**FIGURE 27.** Intrinsic scattering (a) and absorption (b) coefficients of the PDLC 25-A sample obtained from fits of the four-flux model to experimental diffuse components  $T_{diff}$  and  $R_{diff}$



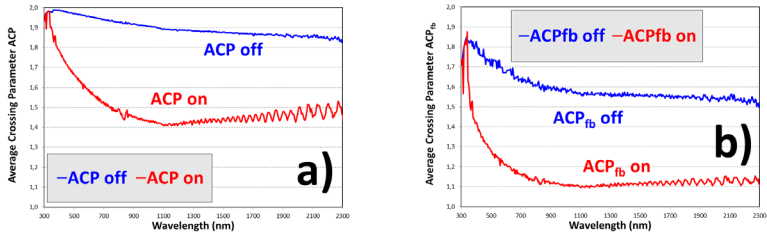
**FIGURE 28.** Intrinsic scattering  $\alpha$  (left) and absorption  $\beta$  (right) coefficients obtained from fits of the collimated-diffuse equations of the four-flux model to experimental diffuse  $T_{diff}$  and  $R_{diff}$  components for A and B PDLC samples.



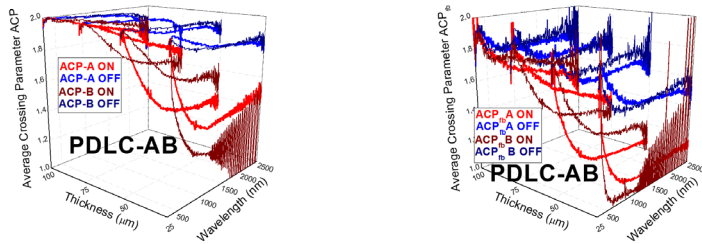
**FIGURE 29.** Intrinsic scattering  $\alpha$  (left) and absorption  $\beta$  (right) coefficients contour plots for A (up) and B (down) PDLC samples.

The lower value for ACP at transparent on state than at translucent off state for PDLC 25-A sample in Fig. 30 is related to the lower haze caused by the liquid crystals that get oriented inside the polymer when applying the AC voltage signal. Discrepancies between ACP and  $ACP_{fb}$  seem to be smaller for the translucent off state, i.e., for higher values of haze. This is in agreement with the assumed errors when approximating KM-2FM [7] with Saunderson correction [8] for samples showing partly collimated T & R components instead of only diffuse ones [15]. For thicker PDLC samples at translucent off states, the discrepancies between ACP and  $ACP_{fb}$  are smaller than for thinner PDLC samples at transparent on states, as seen in Fig. 31 and Fig. 32.

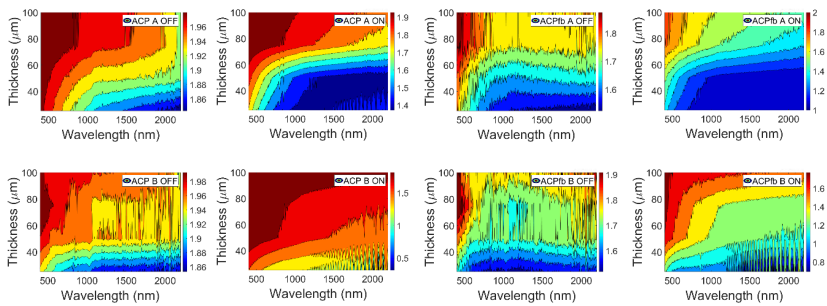




**FIGURE 30.** Average crossing parameter ACP (a) proposed in Eq. (1) and a comparison with ACP<sub>fb</sub> (b) computed in Eq. (2), from a comparison of intrinsic  $\beta$  and extrinsic K absorption coefficients, of the PDLC 25-A sample.



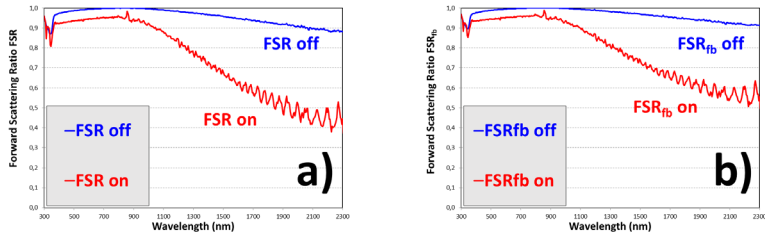
**FIGURE 31.** Average crossing parameter ACP (left) proposed in Eq. (1) and a comparison with ACP<sub>fb</sub> (right) computed in Eq. (2), from a comparison of intrinsic  $\beta$  and extrinsic K absorption coefficients, for A and B PDLC samples.



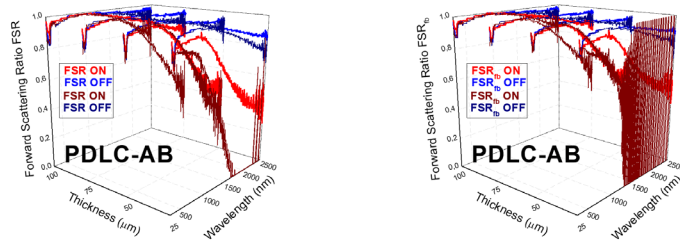
**FIGURE 32.** Average crossing parameter ACP (left) proposed in Eq. (1) and a comparison with ACP<sub>fb</sub> (right) computed in Eq. (2), from a comparison of intrinsic  $\beta$  and extrinsic K absorption coefficients, for A (up) and B (down) PDLC samples.

In the same way as the other parameters—except ACP (whose values vary between 1 and 2), and extinction  $\epsilon$ , intrinsic ( $\alpha$  &  $\beta$ ), and extrinsic (S & K) scattering and absorption coefficients—the value of the FSR parameter can vary between 0 and 1. FSR and  $\alpha$  are obtained by fitting diffuse T & R measurements to MLG-4FM [6] cd equations, as was described in previous work procedures [4,5]. Feedback FSR parameter is obtained relating ACP<sub>fb</sub>, extrinsic S and intrinsic  $\alpha$  scattering coefficients in Eq. (3) [16].

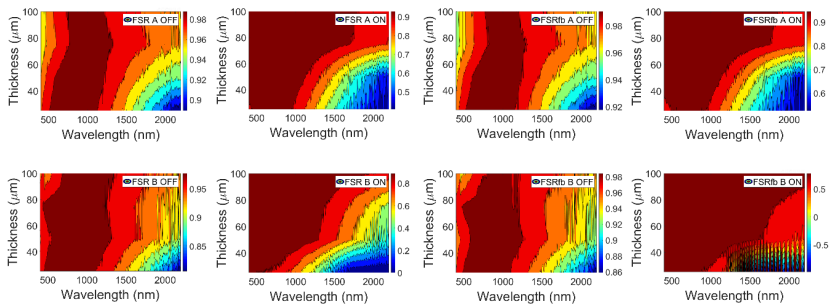
$$S = ACP_{fb} \cdot \alpha \cdot (1 - FSR_{fb}) \quad (3)$$



**FIGURE 33.** Forward-scattering ratio FSR (a) obtained from fits to the collimated-diffuse equations of the four-flux model, and a comparison with  $FSR_{fb}$  (b) computed in Eq. (3) from a comparison of intrinsic ( $\alpha$  and  $\beta$ ) and extrinsic (S and K) scattering and absorption coefficients of the PDLC 25-A sample.



**FIGURE 34.** Forward-scattering ratio FSR (left) obtained from fits to the collimated-diffuse equations of the four-flux model and a comparison with  $FSR_{fb}$  (right) computed in Eq. (3) from a comparison of intrinsic ( $\alpha$  and  $\beta$ ) and extrinsic (S and K) scattering and absorption coefficients for A and B PDLC samples.



**FIGURE 35.** Forward-scattering ratio FSR (left) obtained from fits to the collimated-diffuse equations of the four-flux model and a comparison with  $FSR_{fb}$  (right) computed in Eq. (3) from a comparison of intrinsic ( $\alpha$  and  $\beta$ ) and extrinsic (S and K) scattering and absorption coefficients for A (up) and B (down) PDLC samples.

Compared with ACP and  $ACP_{fb}$  parameters, FSR and  $FSR_{fb}$  parameters show smaller discrepancies for the different thicknesses of PDLC samples, at both translucent off and transparent on states. From comparison of FSR and  $FSR_{fb}$  for PDLC 25-A sample in Fig. 33, the higher haze of translucent off states seems to be the cause of the better approximated extrinsic coefficients using KM-2FM [7] with Saunderson correction [8]

using the Levinson suggestion for samples showing total T & R components, instead of only diffuse ones [15]. Fig. 34 and Fig. 35 show a higher matching between FSR and  $FSR_{fb}$  than that observed between ACP and  $ACP_{fb}$  in Fig. 31 and Fig. 32.

## DISCUSSION

In this paper we have determined the scattering and absorption coefficients of eight polymer dispersed liquid crystal device samples of two different sizes of the active area and four different thicknesses of the inner active layer, at their translucent off and transparent on optical states, by using a procedure previously validated for a suspended particle device [4] and with a commercial polymer dispersed liquid crystal device [5] in a monolayer approximated method.

According to the definition of the inverse problem described in [23], four-flux [6,24,25] and two-flux [7,8] models can be used for determining scattering and absorption of light by small particles without any other information related to the samples characterized than the optical transmittance and reflectance measurements, i.e., “describing a dragon from its tracks” [23]. The inverse problem, considered the hard problem, differs from the direct problem, i.e., “describing the tracks of a given dragon” [23], which uses data such as size, shape, concentration of particles, and optical constants of the particles and of the host medium as input parameters for computing light intensities [26].

Other works [27,28,29,30,31] combine direct and inverse problems for this task. However, recent advances in the inverse problem with new equations determined for intrinsic and extrinsic coefficients were recently carried out [32,33,34,35,36] by differentiating two average crossing parameters (for forward and backward light senses) and four forward scattering ratios (for forward and backward light senses and for collimated and diffuse light beams). The new equations were determined when observing what was called the three-extinction matching requirement, obtained when the same extinction coefficients are computed in three different ways, i.e., from optical constants obtained with the procedure carried out using MLG-4FM [6] collimated-collimated equations for transmittance and reflectance and then from computed collimated light intensities substituted at the forward and backward collimated differential equations. The new equations were found for a sample consisting of three substrate layers [32], i.e., without thin film layers (layers with thickness lower than the wavelength of incident light beam). Multilayer matrixial methods [37,38] must be used with samples containing thin film layers (considered as special interfaces showing absorption of light). However, the three-extinction matching requirement is not observed when the sandwich structure of the characterized samples is approximated in a single layer method and a rule of three is applied to intrinsic and extrinsic coefficients [33,34,35]. Nevertheless, new optical constants of ITO thin film layer [36] recently obtained (that satisfied the three-extinction matching requirement) could be applied in previous works in multilayer method with the suspended particle device [39,40]. As future works, it would be of interest to apply this new procedure with polymer dispersed liquid crystals, with commercial [5] and with the eight samples characterized in the current work, in both single layer and multilayer methods.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Center for Electrochemical Technologies Cidetec S. A. of San Sebastian, Spain, for providing the eight PDLC samples; to Angstrom Laboratory of Uppsala, Sweden, for providing the measurement equipment (Perkin Elmer Lambda 900 spectrometer); to Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas GDAF, for intermediate between Cidetec and Angstrom Laboratory; and to the mobility grants of Universidad Carlos III de Madrid for supporting D.B.'s research in Sweden in 2010, when measurements were carried out.

## AUTHORS' CONTRIBUTIONS

D.B. carried out the measurements, wrote the manuscript, and performed 3D figures; D.B. and C.A. performed Matlab contour plots; D.B. and J.M. found the key reference for computing properly the diffuse interface reflectance; D.B. and J.V. found how to compute diffuse light intensities.

## REFERENCES

- [1] Lampert, C.M. (1994). *Glazing Materials for Solar and Architectural Applications*. International Energy Agency. <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Task%2010-Glazing-Materials-for-Solar-and-Architectural-Applications-Sept1994.pdf>
- [2] Lampert, C.M. (1995). *Chromogenic switchable glazing: Towards the development of the smart window*. Window innovations conference. <https://www.osti.gov/servlets/purl/207602>
- [3] Lampert, C.M. (1998). Smart switchable glazing for solar energy and daylight control. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 52(3-4), 207-221. doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00279-1)
- [4] Barrios, D., Álvarez, C., Miguitama, J., Gallego, D., & 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. *Appl. Opt.*, 58(31), 8871-8881. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.58.008871>
- [5] Barrios, D., Álvarez, C., Miguitama, J., Gallego, D., Wang, J., & Niklasson, G.A. (2022). *Light scattering parameters of polymer dispersed liquid crystals obtained by inversion of experimental data*. Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering. <https://scattport.org/index.php/conferences-menu/715-bremen-zoom-workshop-on-light-scattering-2022>
- [6] Maheu, B., Letoulouzan, J.N., & Gouesbet, G. (1984). Four-flux models to solve the scattering transfer equation in terms of Lorenz-Mie parameters. *Appl. Opt.*, 23, 3353-3362. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.23.003353>
- [7] Kubelka, P. (1948). New contributions to the optics of intensely light-scattering materials: Part I. *J. Opt. Soc. Am.* 38, 448-457. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSA.38.000448>
- [8] Saunderson, J.L. (1942). Calculation of the color of pigmented plastics. *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 727-736. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000727>
- [9] Kortüm, G. (1969). *Reflectance Spectroscopy: Principles, Methods, Applications*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-88071-1>
- [10] Kottler, F. (1960). Turbid Media with Plane-Parallel Surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, 50(5), 483-490. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSA.50.000483>
- [11] Judd, D.B. (1942). Fresnel reflection of diffusely incident light. *J. Research NBS*, 29, 329-332. doi: <https://doi.org/10.6028/jres.029.017>
- [12] Walsh, J.W.T. (1926). *The reflection factor of a polished glass surface for diffused light*. Department of Scientific and Industrial Research.
- [13] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-Pena, J.M., Granqvist, C.G., & 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.12.012>
- [14] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-Pena, J.M., Granqvist, C.G., & 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.044>
- [15] Levinson, R., Berdahl, P., & 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.012>
- [16] Vargas, W. E. (1999). Two-flux radiative transfer model under nonisotropic propagating diffuse radiation. *Appl. Opt.*, 38, 1077-1085. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.38.001077>
- [17] Barrios, D., Torres, J.C., Marcos, C., Pinzón, P.J., Vergaz, R., Sánchez-Pena, J.M., & Viñuales, A. (2011). *Dependence on the thickness and area of the parameters of equivalent electrical circuit model for devices in polymer dispersed liquid crystal on glass substrate*. 7ª Reunión Española de Optoelectrónica.
- [18] Yang, D.-K., & Wu, S.-T. (2006). *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*. John Wiley and Sons, Ltd. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118751992>



- [19] Ramsey, R. A., Sharma, S. C., Henry, R. M., & Atman, J. B. (2003). Electro-optical Properties and Interfacial Charges in Polymer-Dispersed Liquid Crystal Devices. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 771, 339-344. doi: <https://doi.org/10.1557/PROC-771-L10.18>
- [20] Barrios, D., Álvarez, C., & Miguitama, J. (2019). *Visual appearance simulation of polymer dispersed liquid crystal smart windows*. V Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad. Universidad Politécnica Salesiana. <https://abyayala.org.ec/producto/5to-congreso-internacional-de-ciencia-tecnologia-e-innovacion-para-la-sociedad/>
- [21] Swanepoel, R. (1984). Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 17(10), 896-903. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/16/12/023>
- [22] Sagan, C., & Pollack, J.B. (1967). Anisotropic nonconservative scattering and the clouds of Venus. *J. Geophys. Res.*, 72(2): 469-477. doi: <https://doi.org/10.1029/JZ072i002p00469>
- [23] Bohren, C.F., & Huffman, D.R. (1983). *Absorption and scattering of light by small particles*. New York: Wiley. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527618156>
- [24] Beasley, K., Atkins, J.T., & Billmeyer Jr, F.W. (1967). *Scattering and absorption of light in turbid media*. Gordon & Breach Science Publishers.
- [25] Maheu, B., & Gouesbet, G. (1986). Four-flux models to solve the scattering transfer equation: special cases. *Appl. Opt.*, 25, 1122-1128. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.25.001122>
- [26] Mie, G. (1908). Contributions to the Optics of Turbid Media, Particularly of Colloidal Metal solutions. *Annalen der Physik*, 25, 377-445. doi: <https://doi.org/10.1002/andp.19083300302>
- [27] Wang, J., Nilsson, A.M., Barrios, D., Vargas, W.E., Wäckelgård, E., & Niklasson, G.A. (2020). Light scattering materials for energy-related applications: Determination of absorption and scattering coefficients. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2474-2480. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.339>
- [28] Vargas, W.E., Wang, J., & 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), 974-991. doi: <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1801872>
- [29] Vargas, W.E., Wang, J., & 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), 605-623. doi: <https://doi.org/10.1080/09500340.2021.1936244>
- [30] Wang, J., & Niklasson, G.A. (2021). *Extraction of light absorption and scattering coefficients of gold nanocomposites*. Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering. <https://scattport.org/index.php/conferences-menu/689-bremen-zoom-workshop-on-light-scattering-2021>
- [31] Vargas, W.E., Wang, J., & Niklasson, G.A. (2022). *Inversion of light scattering experiments by using the four-flux theory*. Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering. <https://scattport.org/index.php/conferences-menu/715-bremen-zoom-workshop-on-light-scattering-2022>
- [32] Barrios, D. (2023). *Forward scattering ratios, average crossing parameters and scattering and absorption coefficients new expressions using diffuse differential equations of four flux model*. Proceedings of the Bremen Zoom Workshop on Light Scattering. <https://scattport.org/index.php/programs-menu/multiple-particle-scattering-menu/739-scattering-workshop-2023>
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Barrios, D. (2023). *Parameters of differential equations in four-flux and two-flux models approximated for scattering and absorption results on solar thermal collector black paints*. XVIII Encuentro de Física. Escuela Politécnica Nacional.
- [36] Barrios, D. (2023). *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*. XVIII Encuentro Internacional de Física. Escuela Politécnica Nacional.



- [37] Pfrommer, P., Lomas, K.J., Seale, C., & Kupke, C. (1995). The radiation transfer through coated and tinted glazing. *Solar Energy*, 54, 287-299. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)00132-W](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)00132-W)
- [38] Harbecke, B. (1986). Coherent and incoherent reflection and transmission of multi-layer structures. *Appl. Phys. B*, 39, 165-170. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00697414>
- [39] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-Pena, J.M., Mihelcic, M., & Orel, B. (2012). *Decoupling scattering and absorption coefficients of internal color active layers of an inorganic WO<sub>3</sub> and NiO based electrochromic device at bleached and colored states*. IME'10: International Meeting on Electrochromism.
- [40] Barrios, D., & Álvarez, 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. doi: <https://doi.org/10.17807/orbital.v15i1.16470>

## Numeric simulation and experimental validation for a Novel Trapezoidal Solar Collector

Aien Salvo<sup>1\*</sup>, Pablo Dellicompagni<sup>1</sup>, Judith Franco<sup>1</sup> & Nilsa Sarmiento<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto en investigaciones en energías no convencionales (INENCO-CONICET)

<sup>2</sup> Consejo nacional en ciencia y técnica (CONICET)

\*Corresponding author: [aienweni@gmail.com](mailto:aienweni@gmail.com)

## Simulación numérica y validación experimental para un Colector Solar Trapezoidal novedoso

### Abstract

In a global warming context, the diversification of the energy matrix is essential for mitigation. Solar devices have begun to play an important role in this sense, flat-plate solar collectors being the most practical device. On the other hand, numerical modeling and experimental validation are important tools for improving the performance of these technologies. In this work, a trapezoidal solar air heating collector for food drying processes was modeled by using the Simusol open-access software, and experimental validation was performed. This particular shape presents a geometrical novelty since no other similar designs were found in the available literature, even in such an application as food drying. Key parameters, such as air temperature, global efficiency, air mass flow, global heat loss coefficient, and useful heat, are determined and discussed. The proposed air collector numerically behaves as expected. The output air temperature reaches about 100 °C, while the peak heat gain is about 900 W, which makes the air heating collector suitable for drying applications. Due to natural convection being the main heat transferring mechanism, low air mass flows were obtained. For the case analyzed here, this last parameter ranges from 0.012–0.016 kg/s for the optimal thermal behavior. The numerical model developed is a reliable tool for designing thermal technologies without extra capital cost; the increase of collecting area leads to a considerable increase in the thermal power output and improves the psychrometric conditions of heated air.

**Keywords:** Solar air heating, trapezoidal collector, computational simulation, experimental validation, Simusol software, thermal behavior

### Resumen

En el actual contexto de calentamiento global, la diversificación de la matriz energética es fundamental para la mitigación. Las tecnologías solares han comenzado a desempeñar un papel importante en este sentido, siendo los colectores solares de placa plana los más prácticos. Por otro lado, el modelado numérico y la validación experimental son herramientas importantes para mejorar el rendimiento de estas tecnologías. En este trabajo, se modeló y validó experimentalmente un colector de aire solar trapezoidal para procesos de secado de alimentos utilizando el software de código abierto Simusol. Esta forma particular se presenta como una novedad geométrica, ya que no se encontraron otros diseños similares en la literatura disponible, ni siquiera en aplicaciones como el secado de alimentos. Se determinan y discuten parámetros clave, como la temperatura



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



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

Recibido /  
Received:  
06/10/2022

Aceptado /  
Accepted:  
16/12/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
23/01/2024





del aire de salida, la eficiencia global, el flujo de masa de aire, el coeficiente global de pérdida de calor y el calor útil. Los resultados numéricos del comportamiento del colector fueron los esperados. La temperatura del aire de salida alcanza unos 100 °C, mientras que la ganancia máxima de calor es de unos 900 W, lo que hace que el colector solar sea adecuado para aplicaciones de secado. Debido a que la convección natural es el principal mecanismo de transferencia de calor, se obtuvieron bajos flujos de masa de aire. Para el caso analizado aquí, este último parámetro oscila entre 0,012 y 0,016 kg/s para las condiciones óptimas de funcionamiento. El modelo numérico aquí presentado resulta en una herramienta fiable para el diseño de tecnologías térmicas sin coste adicional de capital. El aumento de la superficie de captación conduce a un aumento considerable de la potencia térmica de salida, así como mejoras en las propiedades psicométricas del aire calentado.

**Palabras clave:** calentamiento solar de aire, colector trapezoidal, simulación computacional, validación experimental, programa Simusol, comportamiento térmico

---

## BACKGROUND

Solar energy has been considered the main source of renewable energy in the last years [1]. In this sense, technologies and solar devices have begun to play an important role in the global warming and climate change context [2]. The implementation of solar energy-based technologies, at all scales, promotes a decrease in both fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions [3,4]. In the field of solar thermal energy, flat plate collectors are one of the most widely used technologies due to their easy construction and operation [5]. They are heat exchangers that transform solar radiation into thermal energy [6,7]. Solar air heating collectors (SAHC) are the most widely used devices due to their simple design, although their efficiency is lower than that of solar water heating collectors [8]. However, new designs are continuously being proposed to increase their thermal performance and obtain more compact and lighter devices [9-12]. Since the SAHC are used in multiple applications, they can be assembled in various ways in terms of their configuration and constituent materials [13].

Numerical modeling combined with experimental validation has been widely implemented as a strategy for design optimization of air heating collectors [14-19]. However, several authors have studied the SAHC by focusing on theoretical/numerical development. Zulkifli [8] evaluated two types of covers—glass and Fresnel lens—on a v-groove SAHC and studied the influence of each cover in terms of heat transfer, pressure drop, output temperature, and thermal efficiency. The theoretical and numerical approaches were established using Excel software. These authors reported higher efficiency for a collector covered with Fresnel lens than for those covered with glass, 71.18 % vs. 54.10 %, respectively. Moreover, the mass flow rate contributed to efficiency enhancement. Bhattacharyya [20] determined by numerical simulation the optimum number and dimension of rectangular fins in a single-pass SAHC for two different fin thicknesses. The design and optimization of the SAHCs were carried out using the Computational Fluid Dynamic Model. Qui Lin [21] made a numerical simulation of SAHC with a perforated metallic plate by using a ray-tracing solar load model and obtained the



temperature and velocity distribution on the plate collector. Hernández [22] developed an analytical model to assess the thermal performance of three different collectors: single-pass, double-pass, and double-flow. A robust formulation was elaborated, based on the local energy balance, which made it possible to obtain the efficiency plots for collectors, as well as the input/output temperatures. Other important parameters, such as heat removal factor, convective coefficients, useful heat gain, and global loss coefficients, were formulated. The best thermal behavior was revealed for a double-pass collector, with an optical efficiency of up to 60 % and a peak output temperature of 46.4 °C. This behavior is related to better heat transmission when both upper and bottom air fluxes are opposite.

More advanced numerical simulations can be found in the literature for solar collector optimizations. For example, Zhang et al. [23] have developed a neuronal network to optimize a water heating solar collector. In this study, nanoparticles were added to the heat transfer fluid with different molar fractions and room temperatures, and the performance analysis revealed that thermal conductivity and viscosity could be predicted with an acceptable accuracy, but neuronal networks need to be trained. Nanoparticles improve the thermal efficiency while the molar fraction increases. The numerical optimization is also possible not only for a single solar device. Hajabdollahi et al. [24] studied different combinations for water heating solar collector piping. They implemented the fast and elitist non-dominated genetic algorithm to find the values of optimum design parameters such as bottom isolation, edge isolation, length of collector, width of collector, number of tubes, tube diameter, the number of collectors, and arrangement of collectors in the network. Fuel cost was also included in the analysis. This research concludes that an increase of 10% in the fuel cost yields a decrease in cost ratio by 4.75%. Secondly, an increase of 10% in the total solar energy incident on the collectors means a cost ratio decrease by 9.69% while efficiency increases by 0.0178%. Another research work of solar collectors includes phase change materials (PCM) in their optimization analysis. In this line, Abu-Hamdeh et al. [25] compared the energy efficiency between nanofluids containing paraffin wax/graphene and paraffin wax/graphene oxide phase change materials in flat plate solar collectors. Their results revealed similarities with Hajabdollahi et al. [24], in the sense that including nanoparticles, combined with PCM, increases thermal conductivity, and thus better performance is observed, with even higher values than pure paraffin.

Most authors validated their theoretical developments under laboratory conditions and experimental tests. Reichl [26] performed three-dimensional fluid dynamic simulations for SAHC, where the heat mechanisms of conduction, convection, and radiation were modeled in great detail. Their model was solved by the ANSYS FLUENT software. The experimental setup was carried out at the Test Lab Solar Thermal Systems of the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) in Freiburg. The modeled collector was validated by comparison of the output temperature obtained under laboratory conditions. A high correlation was observed, and therefore, the simulation allowed the authors to predict other parameters, such as absorber temperature, heat transported to air, efficiency, and thermal losses. Badache [27] compared the performance of two types of unglazed thermal collectors with computational fluid dynamics through the FLUENT software. In this case, turbulences within the collector were considered with the Reynolds–Normalized Group (RNG) k–ε turbulence model [28–29]. The experimental tests were performed under a laboratory-



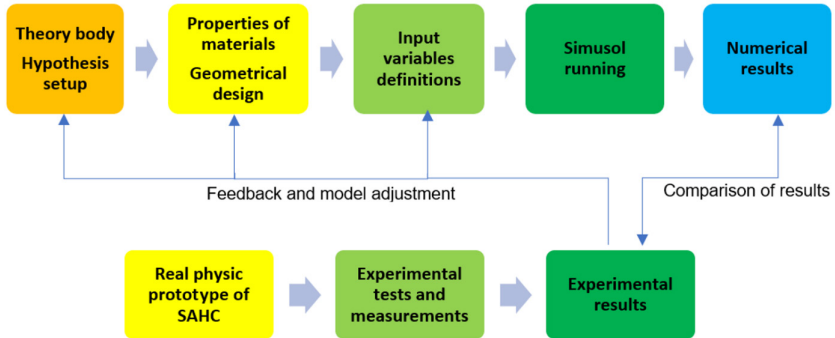
controlled environment, where the collector had a vertical position and the unglazed covering was, in fact, a metallic absorber on which the radiation from lamps impinged. This absorber had a certain number of slots, and the air circulation was forced through them. Both numerical and experimental results were focused on thermal efficiency, combining three mass fluxes with two radiation values and two different plenums. A higher correlation of results with a higher mass flow was observed, while radiation and plenum thickness variations had no substantial influence on efficiency.

The validation of numerical models by experimental investigations under real solar conditions is more valuable than that conducted in the laboratory [3,30-34]. Esmalie [14] developed a complete energy model of a SAHC to predict the air output temperature and velocity profiles and then compared the results with measured data. This comparison revealed an average difference of 3.5% and 1.5% between predicted and measured output air temperature in natural and forced convection, respectively. These values were lower than the results obtained in previous studies, which included error percentages in a range from 4% to 10%. Mustafa and Mustafa [28] performed the numerical simulation of a quarter-circle-shaped SAHC using ANSYS-FLUENT, and a mesh model was created with GAMBIT. They considered viscous properties and turbulence and implemented the RNG  $k-\epsilon$  model to predict and visualize heat transfer and flow field throughout the SAHC. The validation of numerical results was performed with the experimentally measured data, with a reasonable correlation when the air flow temperature difference was plotted against the collector radius. Hernández [30] implemented the Gauss-Seidel iterative method for equation solving. This method allowed them to design and evaluate the thermo-energetic behavior of SAHC with a flat or V-corrugated absorber plate and a porous matrix. Higher air temperature and efficiency are possible due to this porous matrix incorporation. For the validation of their numerical model, both the inlet and outlet air temperatures were measured with K-type thermocouples, and the useful heat gain was compared. This comparison demonstrated a high correlation between numerical and experimental results for four winter days with maximum differences below 3 °C, while the useful heat gain ranged, peaking at 1200 W.

## INTRODUCTION

The work presented here is supported by an academic project for developing a solar dehydrator of tropical fruits and vegetables. The aim of this article is to test how the proposed SAHC operates under different sky conditions, by both experimental and numerical analyses of the thermal performance, following the described methodology in Fig. 1. The solar energy gain takes place in a trapezoidal-shaped SAHC. This particular shape presents a geometrical novelty since no other similar designs were found in the available literature. In comparison to a rectangular-shaped collector, the air velocity increases along the inner channels from the bottom to the top of the collector. On the other hand, the construction of a trapezoidal SAHC could require more complex techniques than solar collectors available in the market. Furthermore, as the collector studied here has bigger dimensions than common ones, its transportability to the emplacement place is more difficult. These technical issues make the trapezoidal SAHC less attractive to be proposed, built, and mounted. This particular shape was selected

because it was designed to be implemented in tropical regions where environmental humidity could be greater than other locations. The additional collecting area also improves the psychrometric properties of the air, mainly its moisture absorption capacity and specific enthalpy.



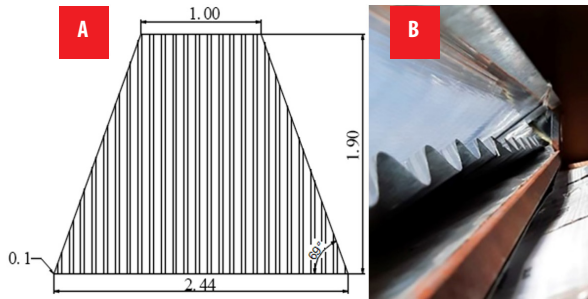
**Figure 1.** Scheme of followed methodology for both numerical simulation and experimental validation.

The SAHC thermal model proposed here is based on natural convection as the main heat transfer mechanism for the air heating process. It is developed using a relatively new free software, called Simusol [35], to determine its thermal behavior, taking into account its geometrical shape, size, and construction aspects. Key parameters, such as air temperature, global efficiency, air mass flow, global heat loss coefficient, and useful heat, are determined and discussed. The validated model will allow the study of the thermal performance of the collector under different climatic conditions. Even more, a simulation of a rectangular-shaped SAHC with the same thermal model is presented in this work to compare differences in results between both technologies.

## CASE OF STUDY DESCRIPTION

Fig. 2 shows the analyzed trapezoidal SAHC. The dimension of the collection area is 2.44 m x 1 m wide (bottom length and top sides, respectively) and 1.9 m length. See Fig. 2a. The total trapezoidal area of collection is 3.3 m<sup>2</sup>. The total inner height is 0.1 m, and the cross section decreases along the collector length. Therefore, the inlet area of the flow is 0.244 m<sup>2</sup> and the outlet area is 0.1 m<sup>2</sup>. This configuration influences air circulation by increasing air velocity as the area decreases.

The covering surface is made of 0.006 m thick alveolar polycarbonate, which was considered as a homogeneous mass into the physical model, and the internal solar reflection effect was dismissed. The external case is made of 0.001 m galvanized steel sheet, and its mass was also dismissed in the model. Additionally, the lateral walls and the bottom of the collector had a 0.05 m fiberglass layer. See Fig. 2b.



**Figure 2.** (A) Scheme of the trapezoidal SAHC and its external dimensions in meters. (B) Inside view of the solar collector output, to be connected into a drying chamber.

The absorber plate is 1 mm-thick, black-painted sinusoidal galvanized steel. However, the absorber was considered as a plane plate, and its thermal conductivity was neglected in the model. The disposition of the absorber plate leads the air circulation into upper and bottom channels. The assumed thermal properties of the materials used in this work are shown in Table 1.

**Table 1.** Properties of the materials

Property	Absorber	Covering	Case	Isolation
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7.850	1.200	-	14
Conductivity $\lambda$ (W/m °C)	-	0.2	-	0.03
Absorptivity $\alpha$ (-)	0.96	-	-	-
Transmittance $\tau$ (-)	-	0.8	-	-
Emissivity $\epsilon$ (-)	0.8	0.9	0.1	-

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL

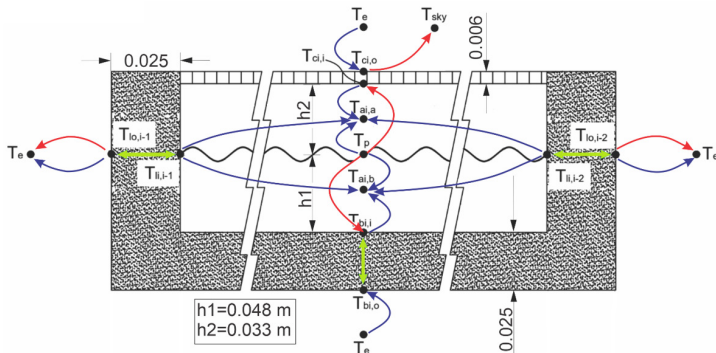
The following hypotheses were considered to formulate the model:

- The air circulation inside the channels is unidirectional, in the input-output direction. In practice, it is favored by the sinusoidal shape of the absorber.
- The roughness of the internal walls is neglected. Under this hypothesis, a uniform air velocity profile for each cross section was assumed.
- Transient disturbances of external wind velocity are not considered.
- The internal multiple reflection effect inside the covering plate is neglected here since there are no precise models related with honeycomb polycarbonates to represent this effect in the literature.



- The thermo-physic properties (thermal conductance, absorbance, and reflectance) are considered as unchanging and the composition of materials homogeneous.
- All the heat fluxes are considered unidirectionally.
- The psychrometric properties of the air nodes (absolute and relative humidity) are not considered at this stage of simulation.
- The spectral solar transmittance of the polycarbonate covering layer is considered as a constant value of 0.85, and its dependence on solar incidence angle is dismissed.

The thermal energy is transferred from the collecting plate to the circulating air by heat convection as the main mechanism [6]. Then, radiative and conductive transmissions are also considered. The air circulation takes place both below and above the absorber plate. This configuration facilitates improvements in the performance of the heat collecting process [22,36]. Hourly measured climatological variables, such as wind speed, solar radiation, and environmental temperature, were considered as boundary conditions. The outer convective coefficients were calculated based on the methodology described by Duffie and Beckman [6]. Fig. 3 shows the physical model implemented in the simulation. In this model, the air temperatures are represented by nodes: one of them located between the plate and the covering surface, and the other one between the plate and the bottom surface. The transmitted solar radiation ( $I\tau$ ) impinges on the absorber, and part of it is absorbed as thermal energy ( $I\tau\alpha$ ), which is partially transferred to the air nodes by convection. The thermal transmission between these air nodes and lateral inner walls is also considered. Thermal conductive mechanisms through the isolation case and the cover are taken into account. Three thermal losses take place in this model: upper (covering surface), lower (bottom surface), and lateral. The boundary conditions on the outer and inner surfaces also include the effect of thermal radiation and convection.



**Figure 3.** Scheme of temperature nodes and thermal transmission circuits, for an arbitrary transversal section considered, where dimensions are in meters. The colors for the different heat transmission mechanisms are: red for irradiative, blue for convective, and green for conductive.



The ribbed shape of the plate is not considered in the model because of its quasi-flat shape. A different case occurs when the absorber has a pronounced irregular form, as noted by Zulkifile [8] and Bashria [37]. Nusselt number conditions for laminar flow, transition, and turbulent flow regions must be treated differently. Nevertheless, in the present design, the transversal areas where air flows can be considered rectangular, without much error. The equations for thermal calculus are described below [38,39].

$$Re_{ij} = \frac{\rho_i v_i Dh_{ij}}{\mu_i} \quad (1)$$

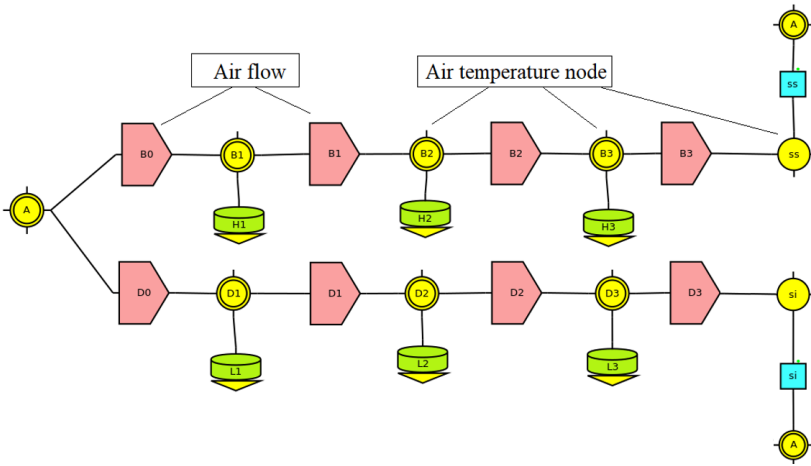
$$Nu_{ij} = \begin{cases} 0.453 Re_{ij}^{0.5} \cdot Pr_{ij}^{0.333} & Pr_{ij} \geq 0.6 \\ 0.0308 Re_{ij}^{0.8} \cdot Pr_{ij}^{0.333} & 0.6 \leq Pr_{ij} \leq 60 \end{cases} \quad (2)$$

$$h_{ij} = \frac{Nu_{ij} \lambda_{ij}}{Dh_{ij}} \quad (3)$$

The temperature dependence of Prandtl ( $Pr$ ), dynamic viscosity ( $\mu$ ), and conductivity coefficient ( $\lambda$ ) are implemented within the program by tables. The values for these parameters were taken from Bergman (2011). A similar consideration was reported by Zulkifile [8] and Bashria [37], but they implemented formulas related to air temperature, instead of discrete values.

As the collector was modeled by dividing the equipment into three sections, subscript  $i$  refers to each transversal discrete section of the collector while subscript  $j$  refers to each convective and radiative coefficient within the same section. Each section is connected to the others by the air flow mass, as shown in Fig. 4.  $B1-3$  and  $D1-3$  nodes represent the temperature of circulating air above and below the absorber plate, respectively. The air mass flow through the collector is the same, but since the transverse section has a linear decrease, the air velocity increases while the air rises through the collector.  $H1-3$  and  $L1-3$  represent the inertial capacitance of the circulating air. The temperature nodes  $ss$  and  $si$  represent the output air temperature for both upper and bottom channels, respectively. Convection was modeled between these nodes and the environmental temperature node, according to Iriarte [40].





**Figure 4.** Model representation of air mass flow through the collector. *B0-3* and *D0-3* correspond to the air flow above and below the absorber plate, respectively.

## Boundary conditions

For any section, the mathematical boundary conditions for the calculation domain are given as:

- **Covering surface**

This surface is exposed to the outer conditions. Convection and radiative transmissions are the heat transfer mechanisms. The aperture area is made of honeycomb polycarbonate and modeled as single thermal conductance with a transmission coefficient of  $\lambda_p=3.6$  ( $W/m^2\text{ }^\circ C$ ). Eq. 4 gives the energy balance for the solar collecting surface.

$$h_{cs,i}(T_{ci,o} - T_e) + F_{sky}\beta_s\epsilon_c\sigma(T_{ci,o}^4 - T_{sky}^4) + F_{sky}(1 - \beta_s)\epsilon_c\sigma(T_{ci,o}^4 - T_e^4) = \lambda_p \frac{(T_{ci,i} - T_{ci,o})}{\Delta y_c} \quad (4)$$

According to Liu [40-43]:

$$\beta_s = \sqrt{0.5(1 + \cos \theta_i)} \quad (5)$$

$$F_{sky} = 0.5(1 + \cos \theta_i) \quad (6)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_e^{1.5} \quad (7)$$

- **Absorber plate**

The absorber is a black painted metallic surface, where solar radiation is partially absorbed and the temperature of the plate rises. The energy balance is given by Eq. 8, where thermal conduction through the metallic surface was neglected due to its thinness.

$$I_i\tau_p\alpha_p = h_{pai,a}(T_{p,i} - T_{ai,a}) + h_{pai,b}(T_{p,i} - T_{ai,b}) + \epsilon_p\sigma[2T_{p,i}^4 - T_{bi,i}^4 - T_{ci,i}^4] \quad (8)$$



• **Bottom surface**

The air circulation below the absorber transmits part of its thermal energy to the bottom surface by convection, and then by conduction through the bottom isolation layer to the outer surface. For any section of the collector, Eq. 9 introduces the thermal condition boundary for the bottom surface, where the conduction of the metallic internal case is neglected due to its thinness.

$$h_{ab,i}(T_{ai,b} - T_{bi,i}) + \epsilon\sigma(T_{p,i}^4 - T_{bi,i}^4) = \lambda_{is} \frac{(T_{bi,i} - T_{bi,o})}{\Delta y_b} \tag{9}$$

• **Lateral inner and outer walls**

The thermal losses through the lateral walls of the collector were also considered in this model. Only the convective mechanism is considered here, for both bottom and upper channels:

$$h \Big|_{ai,a}^{li,i-1} (T_{ai,a} - T_{li,i-1}) + h \Big|_{ai,b}^{li,i-2} (T_{ai,b} - T_{li,i-1}) = \lambda_{is} \frac{(T_{li,i-1} - T_{lo,i-1})}{\Delta x_l} \tag{10}$$

$$h \Big|_{ai,a}^{li,i-2} (T_{ai,a} - T_{li,i-2}) + h \Big|_{ai,b}^{li,i-2} (T_{ai,b} - T_{li,i-2}) = \lambda_{is} \frac{(T_{li,i-2} - T_{lo,i-2})}{\Delta x_l} \tag{11}$$

Then, the heat throughout the walls is transferred to the external atmosphere by convective and radiative mechanisms (Eqs. 12 and 13).

$$\lambda_{is} \frac{(T_{li,i-1} - T_{lo,i-1})}{\Delta x_l} = h \Big|_e^{lo,i-1} (T_{lo,i-1} - T_e) + \epsilon\sigma(T_{lo,i-1}^4 - T_e^4) \tag{12}$$

$$\lambda_{is} \frac{(T_{li,i-2} - T_{lo,i-2})}{\Delta x_l} = h \Big|_e^{lo,i-2} (T_{lo,i-2} - T_e) + \epsilon\sigma(T_{lo,i-2}^4 - T_e^4) \tag{13}$$

### Thermal performance

By definition [6], the thermal loss represents the energy that is not transferred to the heat carrier fluid (HTF), and this energy goes to the atmosphere. A global thermal loss coefficient is defined in terms of convective, conductive, and radiative coefficients. It is also possible to calculate the thermal losses through the top, bottom, and lateral walls separately (Eqs. 14, 15, and 16, respectively).

$$U_t = \sum_{i=1}^{i=3} \phi_{\lambda_{p,i}} [A_{t,i} (T_{ci,i} - T_{ci,o})]^{-1} \tag{14}$$

$$U_b = \sum_{i=1}^{i=3} \phi_{\lambda_{is,i}} [A_{b,i} (T_{bi,i} - T_{bi,o})]^{-1} \tag{15}$$

$$U_l = \sum_{i=1}^{i=3} \sum_{j=2}^j \phi_{\lambda_{is,i-j}} [A_{li,i-j} (T_{li,i-j} - T_{lo,i-j})]^{-1} \tag{16}$$

Heat fluxes  $\phi_{\lambda_{p,i}}$ ,  $\phi_{\lambda_{is,i}}$  and  $\phi_{\lambda_{is,i-j}}$  are calculated by Simusol as conductive losses, and their values can be obtained by simply requesting the simulation results from the software program. Eq. 17 gives the global heat loss coefficient [6].

$$U_g = U_t + U_b + U_l \tag{17}$$



The collector's useful energy gain and the global efficiency are calculated by means of Eqs. 18 and 19, respectively.

$$Q_u = C_p [\dot{m}_a (T_{ai,a}|_{i=3} - T_e) + \dot{m}_b (T_{ai,b}|_{i=3} - T_e)] \quad (18)$$

$$\eta_g = 100 * \frac{Q_u}{I A_c} \quad (19)$$

Both air-mass flows  $\dot{m}_a$  and  $\dot{m}_b$  are determined by instantaneous thermal balance at air temperature nodes *B1* and *D1*, respectively [40].

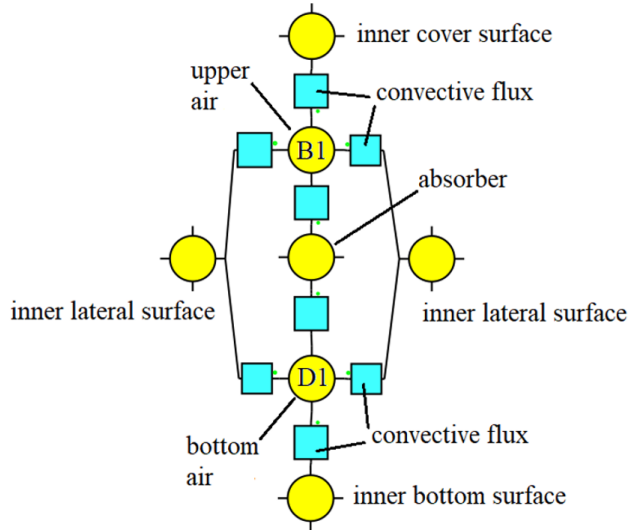
$$\dot{m}_a C_p T_{ai,a}|_{i=1} = \sum_{j=1}^{j=4} \phi_{a,j}|_{i=1} \quad (20)$$

$$\dot{m}_b C_p T_{ai,b}|_{i=1} = \sum_{j=1}^{j=4} \phi_{b,j}|_{i=1} \quad (21)$$

So, the total air mass flow results in:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_a + \dot{m}_b \quad (22)$$

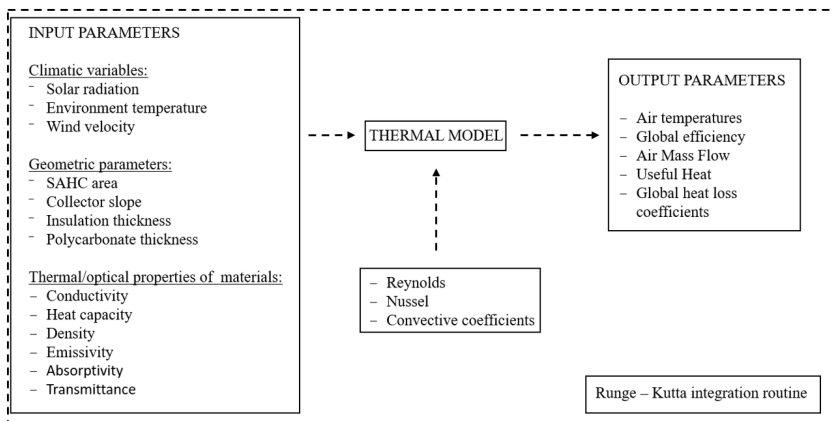
The convective fluxes  $\phi_{a,j}|_{i=1}$  and  $\phi_{b,j}|_{i=1}$  are calculated by Simusol and represent the thermal gain from the absorber, lateral walls, covering, and bottom surface into respective air flow nodes, as Fig. 5 shows.



**Figure 5.** Scheme of convective fluxes into air flow nodes, for the first section of the SAHC

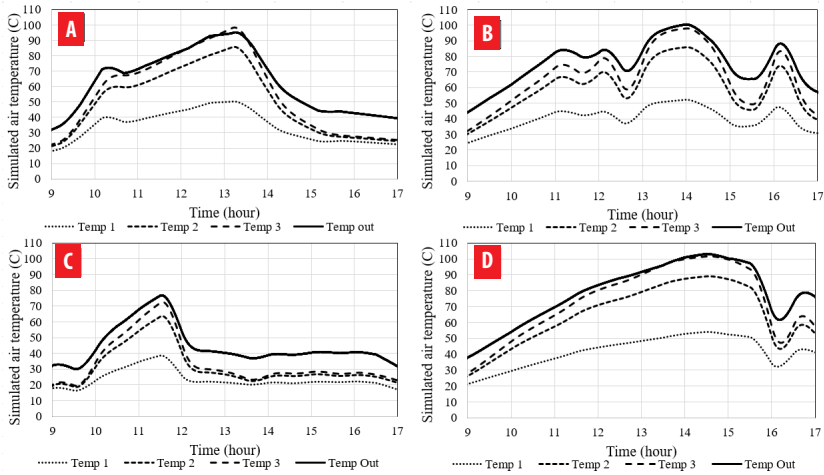
## SIMULATION RESULTS

Simusol generates a spreadsheet with a 7 s time-step for each parameter. It also shows a set of time-dependent variables upon request; otherwise, Simusol shows the temperature profile for all the thermal nodes in the model. To perform the simulation, the model presented here requires some climatological data input: the solar radiation based on experimental measurements, the environmental temperature, and the wind velocity in the area surrounding the collector. This information is given by tables, and they can be repeated many times by a *Prep* command. It is also important to define the slope of the collector and the geometrical dimensions. Since Simusol runs on Linux, it can be launched in a user terminal from the folder where the .dia file is located, using the *simusol* command. It is important to save all changes made in the model before starting the simulation. Fig. 6 shows a diagram of the interaction between the thermal model, the climatological data entry, the thermal/optical properties of the materials, and the geometrical design parameters for upper and bottom channels. Differential equations are solved by the fourth-order Runge-Kutta method [41], which is a simple, robust, and suitable option for the numerical solution of differential equations combined with an intelligent adaptive step-size routine.



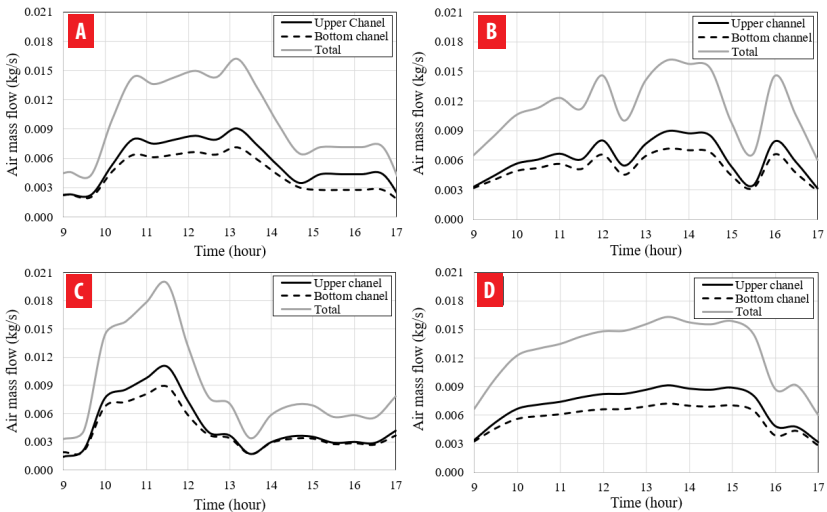
**Figure 6.** Scheme of the thermal model implemented on Simusol.

Four days were selected to perform the numerical simulation, with mainly two types of days: clear and partially cloudy. The aim was to reproduce the conditions of variability, as realistically as possible, with which the experimental SAHC must operate. Fig. 7 shows the temperature profile of the air flux in the upper channel. To simplify the graphs, a period from 9 a.m. to 5 p.m. was defined as the operating time of the SAHC.



**Figure 7.** Simulated air temperature for the upper channel. Temp 1 to 3 and Temp out correspond to nodes B 1 to 3 and temp ss in Fig. 3. (A) March 29, (B) April 6, (C) April 12, (D) April 15.

It can be observed that the output temperature of the upper air can reach about 100 °C. For some processes like food drying, this temperature could be higher than necessary but ideal for certain grains, seeds, and corn. However, this temperature value enables the SAHC to be applied to other processes with higher thermal demand. The high temperatures obtained here are strongly related to the high solar radiation values measured at the location and the additional collecting area due to the trapezoidal shape of the SAHC.

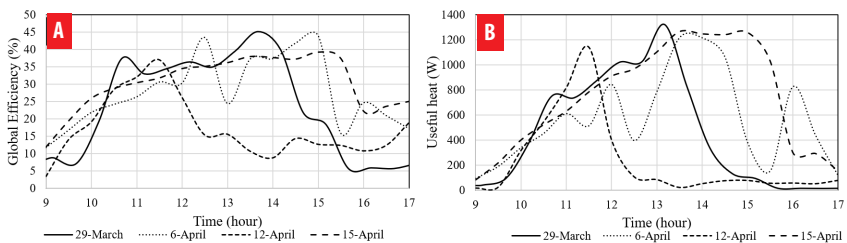


**Figure 8.** Air mass flow profiles for both upper and bottom channels of the SAHC and total air mass flow. (A) March 29, (B) April 6, (C) April 12, (D) April 15.

Eqs. 20, 21, and 22 give the air mass flow in kg/s for both upper and bottom channels and the total air mass flow, respectively. The heat gain and the air temperature are important in establishing the air mass flow (Fig. 8). It can be observed that the air mass flow is different for each channel because of the different heat gains. The highest air mass flow corresponds to the upper channel, which means that the air velocity is the highest there. This numerical result was expected because the heat source (the absorber) is located under the air thermal node in the upper channel, while the same heat source is located above the air thermal node in the bottom channel.

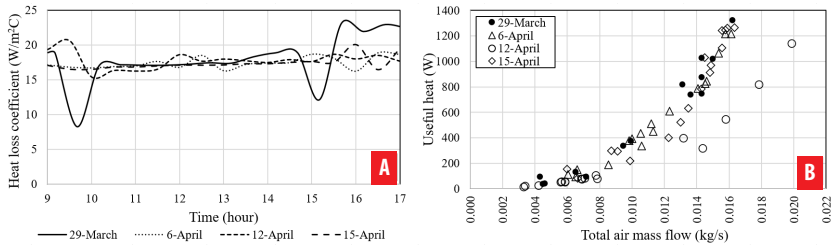
The values of the total air mass flow range from 0.0015 kg/s to 0.02 kg/s. Other studies of SAHC yielded values of 0.019–0.028 kg/s [20], 0.017 kg/s [44], 0.013–0.04 kg/s [45], and 0.056 kg/s [46]. It is important to note that there are significant differences between the mentioned systems, such as the position and slope, the geometry, and the absorber shape and materials. Nevertheless, the air mass flows obtained here correspond to those normally obtained for this kind of technology.

The useful heat gain is determined by Eq. 18, which takes into account the air mass flows of both channels and the difference in output-input air temperatures. Here, the dependence on the temperature of the specific heat of the air was neglected. Fig. 9 shows the useful heat profiles for the four days considered. A maximum thermal power output of about 1200 W can be reached by the SAHC under study. The global efficiency is determined by Eq. 19, and Fig. 9 shows this parameter, where, in clear-sky conditions of operation, an average value of 35% is observed, in the hours around the midday, while efficiency varies on cloudy-sky days. Peaks of about 45% on global efficiency are reached by this SAHC.



**Figure 9. (A) Global efficiency, and (B) useful heat gain.**

One of the main parameters to be considered in describing the collector's performance is the global heat loss coefficient, which is given by Eq. 17. In this model, the top, lateral, and bottom thermal losses were considered separately, and then the global heat loss was estimated. Fig. 10 shows the time variation of the total global heat loss coefficients for all the considered days. For the operating period, the global heat coefficient ranged from 16 to 18 W/m<sup>2</sup>°C. The literature reports a normal value of 10 W/m<sup>2</sup>°C [6] for a single covered air heating solar collector.

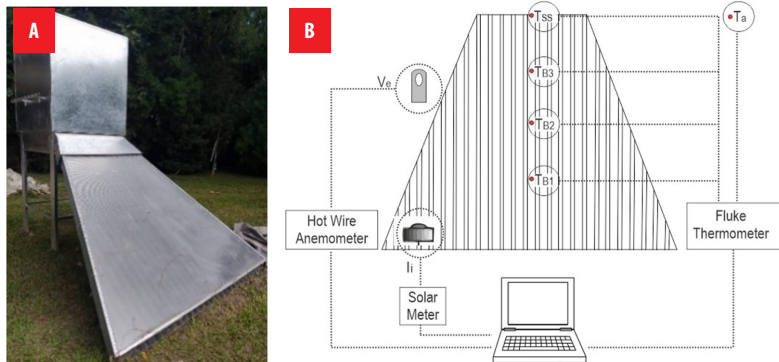


**Figure 10. (A)** Global heat loss coefficients. **(B)** Useful heat gain related to the total air mass flow.

Fig. 10 shows the range of air mass flow for the heated air production, considering the thermal power output of the SAHC. For optimal performance, the SAHC should operate in a range of 0.016–0.020 kg/s. This must be considered if a forced air circulation system is integrated into the SAHC.

## EXPERIMENTAL SETUP

The trapezoidal SAHC location was -24.69 Latitude and -65.39 Longitude, and it was north-oriented with a fixed optimal slope of 36° for a homogeneous solar collection throughout the year. In order to replicate the real working conditions, the SAHC was connected to a drying chamber of 1 m<sup>3</sup> volume, as shown in Fig. 11a.



**Figure 11. (A)** Trapezoidal SAHC connected to the drying chamber, in its working position. **(B)** Scheme of measuring devices used for data recording.

The solar radiation was measured with a solarimeter placed on the covering surface of the SAHC, as shown in Fig. 11.b. The air temperatures were measured according to the nodes in the simulation model: B1, B2, B3, and ss. It was only possible to place the temperature sensors in the upper channel of the collector. A thermometer Fluke 54 II with type-K thermocouples was used for measuring the temperature. The surrounding wind velocity was measured using a hot-wire anemometer. Table 2 briefly describes the used instruments.

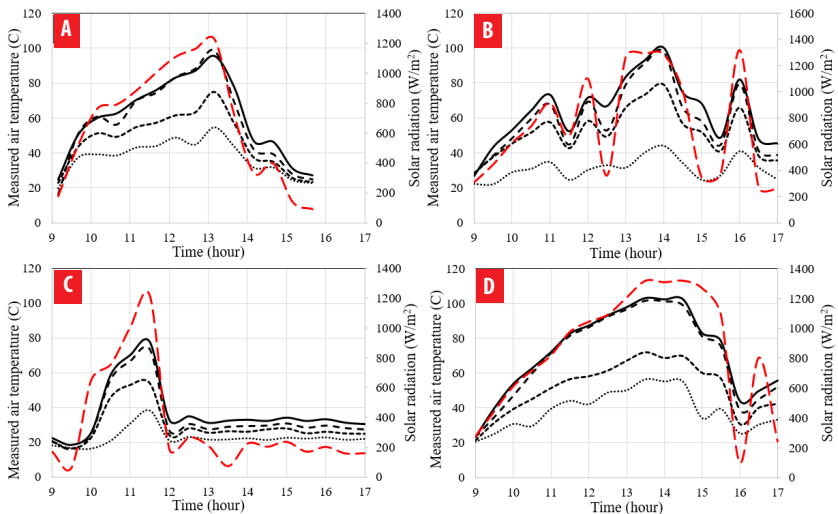


**Table 2.** Properties of the measurement equipment

Parameter	Device	Accuracy
Temperature	Fluke 54 II thermometer with thermocouple K-type	0.1 °C
Wind velocity	Hot-wire anemometer TES 1341	0.01 m/s
Solar radiation	HT204 solar power meter	1 W/m <sup>2</sup>

## Experimental results

The temperatures of the circulating upper air were measured. As commented in the previous section, K-type sensors were used and the measuring procedure was carried out during the operative period of the SAHC, from 9 a.m. to 5 p.m. Although the ASHRAE code sets the conditions for testing the equipment [47], both clear-sky and cloudy-sky conditions were considered to make simulations under real operative situations. Fig. 12 shows the measured air temperatures for the upper channel. It can be observed that the air temperature peaks between 80 °C and 100 °C. As expected, the shape of the curves follows the solar radiation profile. This indicates that the SAHC has low thermal inertia, and it can quickly reach the thermal state of operation when the solar radiation has suitable values. Since drying processes require a temperature range of 50–60 °C [48] for optimal performance, the SAHC needs solar radiation between 600 W/m<sup>2</sup> and 900 W/m<sup>2</sup>. For cloudy-sky conditions, with solar radiation of about 200 W/m<sup>2</sup>, the outer air temperature is about 35–40 °C. This represents an advantage because a reduced size of an auxiliary heat source is available, if necessary.

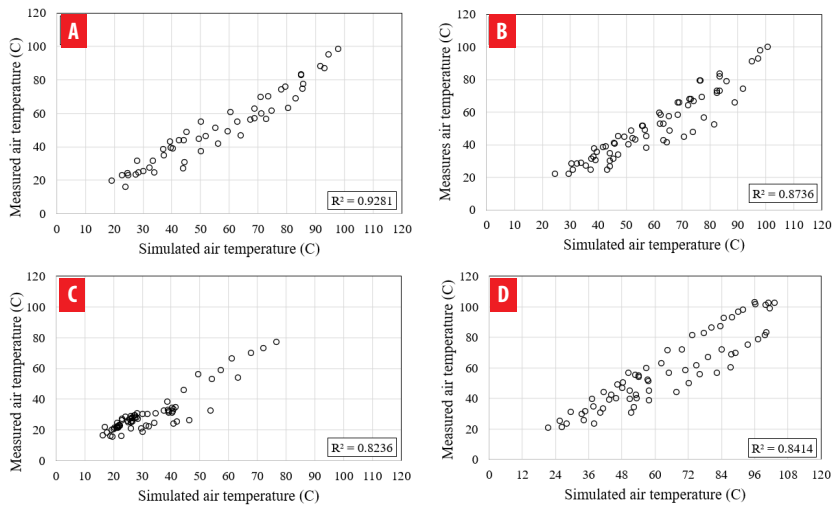


**Figure 12.** Measured air temperatures in the upper channel. The *Temp out* plot corresponds to the *ss* node from the simulation. (A) March 29, (B) April 6, (C) April 12, (D) April 15.

The main reason for these differences is the weather input data values for every single day, referred basically to the solar radiation, environmental temperature, and surrounding wind velocity. It can be observed that the temperature response in the simulations coincides with the experimental measured one (every single plot in Fig. 7 compared with those in Fig. 12).

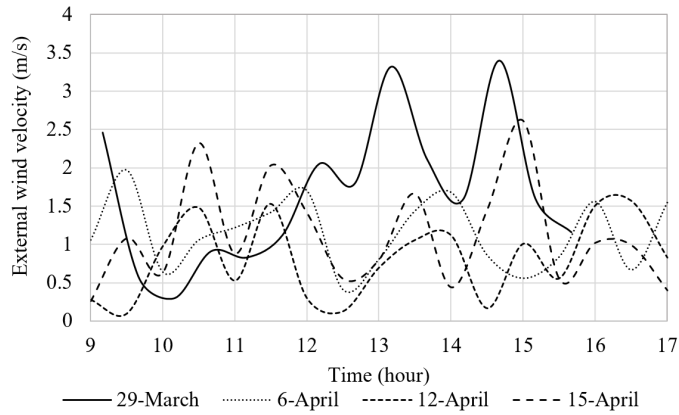
## MODEL VALIDATION

The experimental and numerical results were compared (Fig. 13). Based on direct measurements, the air temperature for the upper channel was considered the main variable for performing the comparison. For the set of measured days, the determination coefficient  $R^2$  ranged from 0.82 to 0.93. The lowest correlation was obtained for a mostly cloudy day, where the predominant solar radiation was about  $200 \text{ W/m}^2$  after midday (April 12). This correlation can be considered acceptable despite the unstable working conditions. For a clear-sky condition, the correlation coefficient was 93%. Intermediate correlation values were observed for semi-cloudy sky conditions. The more stable climatic conditions, the better adjustment is achieved by the numerical model.



**Figure 13.** Comparison between experimental and numerical air temperatures.  
(A) March 29, (B) April 6, (C) April 12, (D) April 15.

The scattering observed in Fig. 13 can also be explained by the surrounding wind variability when the measurements were performed (Fig. 14). As the SAHC studied here is a natural convective one, the oscillation of external wind produces variations in the external pressure near the inlet/outlet zones, influencing the air mass flow inside the SAHC, and therefore, the internal convective coefficients present high variability. Fig. 14 also shows a range of 0.1–3.4 m/s for wind velocity. This is a climatological feature of the region where the SAHC is mounted [49].



**Figure 14.** External wind velocity surrounding the SAHC.

The reliability of the comparison was analyzed using Infostat software. In addition to the  $R^2$ , other coefficients were determined. Table 3 shows the  $p$ -value, standard error ( $\sigma_x$ ), mean absolute error ( $\epsilon$ ), asymmetry, and Kurtosis coefficients.

**Table 3.** Statistical parameters for the model validation process

Day	$R^2$ (%)	$p$ -Value	$\sigma_x$ (°C)	$\epsilon$ (°C)	Asymmetry		Kurtosis	
					Meas.	Sim.	Meas.	Sim.
29 <sup>th</sup> March	92.81	0.0000	5.86	4.80	1.14	0.44	-1.11	-1.78
6 <sup>th</sup> April	87.36	0.0000	7.21	5.52	1.89	0.68	-0.84	-1.57
12 <sup>th</sup> April	82.36	0.0000	5.78	4.43	6.63	4.55	5.95	2.39
15 <sup>th</sup> April	84.14	0.0000	9.69	8.15	1.33	0.34	-1.55	-1.95

The results of the statistical analysis show a  $p$ -value lower than 0.05 for all cases, which indicates a statistically significant relation between the simulated and measured values, with a confidence level of 95%. As mentioned above, the model explains the correlation between the analyzed variables by an  $R^2$  higher than 80%, which indicates a good relation between variables. In general, asymmetry and kurtosis coefficients present values within a 2 – -2 range. This implies that the data sets have a normal distribution. However, it was observed outside the range values only for April 12. This significant deviation was caused by the high meteorological variation: solar radiation decrement combined with high external wind velocity.

## DISCUSSION

The numerical results obtained in the present study are closely comparable with the results of other authors. The comparison of the main parameters is shown in Table 4. As mentioned in the introduction section, no one single case for trapezoidal collector was found in the



literature. While most of the designs were focused on thermal efficiency, with values above 60% (similar to vacuum pipes based-on collector) mostly reached, low thermal power outputs were reported. Additionally, the reported outlet air temperature was no higher than 71 °C. This could be related to different parameters such as solar resource and sky conditions, orientation and disposition of collectors, sizes of solar absorber, materials used for prototype constructions, etc. The solar collector studied here reached higher temperatures and power thermal output, despite the fact that lower thermal efficiency was performed, compared with other works. This increase of air temperature and power thermal output was due to the extra area conforming the trapezoidal shape of the collector. Additionally, a numerical scenario as the SAHC built with rectangular shape was presented here. In this case, temperatures, efficiencies, and power outputs were similar to other authors. Furthermore, the comparison between both proposed models (trapezoidal and rectangular) revealed that better air heating conditions are easily achieved by simple modification in geometrical shape and collecting area expansion.

**Table 4.** Comparison between results obtained in other studies

Author	Technology	Air mass flow	Area	Tout	Efficiency	Useful heat
Kareem et al., 2016	Forced multi-pass solar dryer	0.01-0.07 kg/s	1.75 m <sup>2</sup>	55.49 °C	59.96 %	-
Li et al., 2011	Vertical SAHC with aluminum perforated plate	0.03 kg/s	0.4 m <sup>2</sup>	16.4 °C av.	80-89 %	202 W av.
Zhu et al., 2017	V-shaped flat-plate SAHC with micro-heat pipe arrays	0.054 kg/m <sup>2</sup> s	1.8 m <sup>2</sup>	46.5 °C	69 %	-
Zulkifile et al., 2018	V-grove with: a) single glass b) Fresnel lens	0-0.09 kg/s	1 m <sup>2</sup>	a) 35.85 °C b) 38.39 °C	a) 47.10% b) 71.18%	-
Present study	Trapezoidal shaped SAHC	0.0015-0.02 kg/s	3.268 m <sup>2</sup>	103.5 °C	35% av. 45% max.	1321 W max.
Present study	Rectangular shaped SAHC	0.0015-0.013 kg/s	1.9 m <sup>2</sup>	72 °C	21% av. 49.7% max.	594 W max.

## CONCLUSION

A numerical model is proposed based mainly on a convective heat transfer mechanism. The air heat gain was modeled for both upper and bottom channels. This model differs from those of other authors in that the air temperatures are considered individual thermal nodes, so it is possible to determine each heat flux in the air nodes. Modeling based on convection as the predominant heat transfer mechanism made it possible to obtain reasonable numerical results and determine the most suitable materials for air heating applications. The numerical analysis of the trapezoidal-shaped SAHC considers the measured values of the solar irradiation that reaches the outer covering surface, as well as



the environmental temperature and external wind velocity. Two possible scenarios were considered to test the model proposed: clear-sky and cloudy-sky conditions. The numerical simulation was performed using an open-access software program called Simusol.

It was found that the SAHC can heat the air up to 100 °C. Moreover, lower temperatures can be obtained from lower solar radiation, of over 50 °C. The air mass flow ranged between 0.0015 and 0.02 kg/s, with an optimal range of 0.016–0.02 kg/s for the maximum heat gain (1140–1321 W). The numerical simulations revealed a satisfactory thermal performance for food drying applications and other low enthalpy processes. It is important to note that the trapezoidal-shaped SAHC studied here is a natural convective type and the obtained performance has advantages over similar technologies since an air forcing system is not needed, allowing energy savings. Although the achieved global efficiencies are not the main feature of the proposed design, 35% under stable operating conditions would be considered acceptable if the thermal performance (output temperatures, power thermal generation, and global heat loss) is taken into account.

The trapezoidal design of the collector increases the collecting area in a range of 1.8 to 8.2 times higher than the rectangular technologies found in the literature, without extra capital cost or initial investment and using the same constructive techniques. By increasing the collecting area, a considerable increase in the thermal power output was noted, despite the decrease in the global efficiency. Furthermore, Table 4 shows the numerical results for a rectangular SAHC with 1.9 m<sup>2</sup> of collecting area (1 m width and 1.9 m length), which was simulated by using the validated model presented here and taking in consideration both the same climatic conditions and constructive materials as the trapezoidal one. It is observed that the output temperature remains about 100 °C despite its poor global efficiency. Low useful heat is also observed for this rectangular configuration, and this could be explained due to the low air mass flow under natural convective conditions, suggesting the implementation of air forced systems to the designed SAHC in order to improve the thermal gain and the efficiency as well.

The modeling implemented in Simusol demonstrates once again that it is a reliable numerical tool for designing thermal technologies. Although the SAHC behaved as expected, more experiments are necessary to fine-tune the model. Additionally, a more accurate numerical description of the internal convective heat transfer mechanism could further improve the model. More accurate heat and mass transfer modeling will be done in the future, even with the drying chamber included in the model.

## NOMENCLATURE

$A_{b,i}$	Area of the bottom layer, for the $i$ section, m <sup>2</sup>
$A_c$	Total area of the covering surface, m <sup>2</sup>
$A_{l,i-j}$	Area of the lateral layer, for the $i$ section and $j$ element, m <sup>2</sup>
$A_{t,i}$	Area of the covering layer, for the $i$ section, m <sup>2</sup>
$C_p$	Average heat capacity of the air, J/kg °C
$Dh_{i,j}$	Hydraulic diameter of channels, for the $i$ section and $j$ element, m
$F_{sky}$	View sky factor, dimensionless
$h_{ab,i}$	Convective coefficient between the bottom surface and bottom air nodes, for the $i$ section, W/m <sup>2</sup> °C



- $h_{cs,i}$  Convective coefficient from outer cover surface to the environmental nodes, for the  $i$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{ij}$  Internal convective coefficient, for the  $i$  section and  $j$  element,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{ai,a}^{i-1}$  Convective coefficient between the upper air node and left inner wall, for the  $i=1$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{ai,a}^{i-2}$  Convective coefficient between the upper air node and right inner wall, for the  $i=1$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{ai,b}^{i-2}$  Convective coefficient between the bottom air node and left inner wall, for the  $i=1$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{ai,a}^{i-2}$  Convective coefficient between the bottom air node and right inner wall, for the  $i=1$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{pai,a}$  Convective coefficient between the absorber and the upper air nodes, for the  $i$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $h_{pai,b}$  Convective coefficient between the absorber and the bottom air nodes, for the  $i$  section,  $W/m^2\text{°C}$
- $I, I$  Solar radiation that impinges into the covering surface,  $W/m^2$
- $\dot{m}_a$  Upper air mass flow,  $kg/s$
- $\dot{m}_b$  Bottom air mass flow,  $kg/s$
- $\dot{m}_t$  Total air mass flow,  $kg/s$
- $Nu_{ij}$  Nusselt number, for the  $i$  section and  $j$  element, dimensionless
- $Pr_{ij}$  Prandtl number, for the for the  $i$  section and  $j$  element, dimensionless
- $Qu$  SAHC useful energy gain of the output air,  $W$
- $Re_{ij}$  Reynolds number, for the  $i$  section and  $j$  element, dimensionless
- $T_{ai,a}$  Temperature of the upper air node, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{ai,a|l=1}$  Temperature of the upper air node, for the  $i=1$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{ai,a|l=3}$  Temperature of the upper air node, for the  $i=3$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{ai,b}$  Temperature of the bottom air node, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{ai,b|l=1}$  Temperature of the bottom air node, for the  $i=1$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{ai,b|l=3}$  Temperature of the bottom air node, for the  $i=3$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{bij}$  Temperature of the inner bottom surface, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{b|o}$  Temperature of the outer bottom surface, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_c$  Temperature of covering layer,  $^{\circ}C$
- $T_{ci}$  Temperature of inner cover surface, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{ci,o}$  Temperature of outer cover surface, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_e$  Environmental temperature,  $^{\circ}C$
- $T_{ib}$  Temperature of bottom insulation layer,  $^{\circ}C$
- $T_{li-1}$  Temperature of left lateral inner wall, for the  $i=1$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{li-2}$  Temperature of right lateral inner wall, for the  $i=1$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{li-j}$  Temperature of lateral inner wall, for the  $i$  section and  $j$  element,  $^{\circ}C$
- $T_{li-1}$  Temperature of left insulation layer,  $^{\circ}C$
- $T_{li-2}$  Temperature of right insulation layer,  $^{\circ}C$
- $T_{lo-j}$  Temperature of lateral outer wall, for the  $i$  section and  $j$  element,  $^{\circ}C$
- $T_{pi}$  Temperature of the absorber, for the  $i$  section,  $^{\circ}C$
- $T_{sky}$  Temperature of sky,  $^{\circ}C$
- $U_b$  Total heat loss coefficient for the bottom layer,  $W/m^2\text{°C}$
- $U_g$  Global heat loss coefficient for SAHC,  $W/m^2\text{°C}$
- $U_l$  Total heat loss coefficient for the lateral layers,  $W/m^2\text{°C}$
- $U_t$  Total heat loss coefficient for the covering layer,  $W/m^2\text{°C}$



- $V_i$  Internal air velocity, m/s  
 $Y$  Thickness of the covering/bottom/lateral layers for conductive fluxes calculation, m

## GREEK SYMBOLS

- $\Phi_{\lambda_{is},i}$  Conductive heat flux throughout the bottom layer, for the  $i$  section, W  
 $\Phi_{\lambda_{is},i,j}$  Conductive heat flux throughout the lateral layer, for the  $i$  section and  $j$  element, W  
 $\Phi_{\lambda_{cs},i}$  Conductive heat flux throughout the covering layer, for the  $i$  section, W  
 $\Phi_{a|j|l=1}$  Convective heat flux from  $j$  inner surface to the upper air node, for the  $i=1$  section, W  
 $\Phi_{b|j|l=1}$  Convective heat flux from  $j$  inner surface to the bottom air node, for the  $i=1$  section, W  
 $\alpha_p, \alpha$  Absorptance of the metallic absorber, dimensionless  
 $\beta_s$  Factor that splits the heat exchange with the sky dome between sky and air radiation, dimensionless  
 $\eta_g$  Global efficiency of the SAHC, %  
 $\theta_i$  Solar incidence angle, °  
 $\lambda$  Conductive coefficient of materials, W/m °C  
 $\lambda_{ij}$  Air conductivity coefficient, for the  $i$  section and  $j$  element, W/m °C  
 $\lambda_{is}$  Conductive coefficient of fiberglass, W/m °C  
 $\lambda_p$  Conductive coefficient of polycarbonate, W/m °C  
 $\mu_i$  Dynamic viscosity, Pa s  
 $\tau_p, \tau$  Transmittance of the polycarbonate covering layer, dimensionless  
 $\epsilon$  Emissivity coefficient, dimensionless  
 $\rho$  Density of materials, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_i$  Air density, kg/m<sup>3</sup>  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmann constant,  $5.670373 \times 10^{-8}$  W/s K<sup>4</sup>

## ACKNOWLEDGES

The authors wish to thank Prof. Nahuel Salvo for providing support on numerical modeling.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Aien Salvo and Pablo Dellicompagni designed and conceived the investigation; Judith Franco administered the project; and Nilsa Sarmiento provided resources.

## FUNDING SOURCE

This work was supported by Secretaría de Cooperación Técnica y Relaciones Internacionales (National University of Salta), under the research project *Agregando valor a la producción frutihortícola de la región con Energías Renovables*. Resolution R-N° 1995/2019.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.



## REFERENCES

- [1] Petroleum, B. (2019). BP statistical review of world energy 2017. *Statistical review of world energy*, 65. <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- [2] Gielen, D., Gorini, R., Wagner, N., Leme, R., Gutierrez, L., Prakash, G., ... and Renner, M. (2019). *Global energy transformation: a roadmap to 2050*. IRENA. <https://fr.slideshare.net/wyakab/irena-global-energy-transformation-a-roadmap-2050>
- [3] Dellicompagni, P., Franco, J. and Flexer, V. (2019). Reducción de emisiones en la industria de litio en la Puna Argentina mediante tecnologías solares de concentración. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23. <https://portaldervistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1172>
- [4] Ullah, F., Khattak, M. K., Kang, M., Li, N., Yang, J. and Wang, X. (2017). Numerical simulation on thermal performance of flat plate solar collector with double glass covers. *Journal of Applied Sciences*, 17(10), 502-510. doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2017.502.510>
- [5] Arunkumar, H. S., Karanth, K. V. and Kumar, S. (2020). Review on the design modifications of a solar air heater for improvement in the thermal performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100685. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100685>
- [6] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- [7] Kreith, F. (2017). Stirling engines. In *Energy Conversion* (pp. 447-454). CRC Press.
- [8] Zulkifle, I., Alwaeli, A. H., Ruslan, M. H., Ibarahim, Z., Othman, M. Y. H. and Sopian, K. (2018). Numerical investigation of V-groove air-collector performance with changing cover in Bangi, Malaysia. *Case studies in thermal engineering*, 12, 587-599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.012>
- [9] Rahmani, E., Moradi, T., Fattahi, A., Delpisheh, M., Karimi, N., Ommi, F. and Saboohi, Z. (2021). Numerical simulation of a solar air heater equipped with wavy and raccoon-shaped fins: The effect of fins' height. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101227>
- [10] Ammar, M., Mokni, A., Mhiri, H. and Bournot, P. (2021). Performance optimization of flat plate solar collector through the integration of different slats arrangements made of transparent insulation material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101237>
- [11] López-Sosa, L. B., Ortiz-Carrión, A., Espinosa-Gómez, D., Medina, J. Z. and González-Avilés, M. (2021). Solar air heating system with low environmental impact materials: Mathematical model and optothermal characterization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101399>
- [12] Zheng, W., Zhang, H., You, S., Fu, Y. and Zheng, X. (2017). Thermal performance analysis of a metal corrugated packing solar air collector in cold regions. *Applied energy*, 203, 938-947. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.016>
- [13] Villar, N. M., López, J. C., Muñoz, F. D., García, E. R. and Andrés, A. C. (2009). Numerical 3-D heat flux simulations on flat plate solar collectors. *Solar energy*, 83(7), 1086-1092.
- [14] Esmalie, F., Ghadamian, H. and Aminy, M. (2014). Modeling and simulation of a solar flat plate collector as an air heater considering energy efficiency. *Mechanics & Industry*, 15(5), 455-464. doi: <https://doi.org/10.1051/meca/2014047>
- [15] Subiantoro, A. and Ooi, K. T. (2013). Analytical models for the computation and optimization of single and double glazing flat plate solar collectors with normal and small air gap spacing. *Applied energy*, 104, 392-399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.009>
- [16] Vall Aubets, S., Johannes, K., David, D. and Castell, A. (2020). A new flat-plate radiative cooling and solar collector numerical model: Evaluation and metamodeling. *Energy*, 2020, 202, a117750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117750>
- [17] Wang, L., Man, Y., Shi, S. and Wang, Z. (2017). Application of solar air collector and floor air supply heating system in winter. *Procedia Engineering*, 205, 3623-3629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.216>



- [18] Li, W., Xu, S., Dong, H. and You, J. (2011). Numerical Simulation Study on a Flat-Plate Solar Air Collector. In *Communication Systems and Information Technology: Selected Papers from the 2011 International Conference on Electric and Electronics (EEIC 2011) in Nanchang, China on June 20-22, 2011, Volume 4* (pp. 117-123). Springer Berlin Heidelberg. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21762-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21762-3_15)
- [19] Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S. and Abdenouri, N. (2019). Simulation, design and experimental performance evaluation of an innovative hybrid solar-gas dryer. *Energy*, 189, 116279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116279>
- [20] Bhattacharyya, T., Anandalakshmi, R. and Srinivasan, K. (2017). Heat transfer analysis on finned plate air heating solar collector for its application in paddy drying. *Energy Procedia*, 109, 353-360. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.086>
- [21] Qiu, L., Zou, Y. and Huang, L. (2011). Simulation Analysis on a Special Air-Heating Collector. *Applied Mechanics and Materials*, 88, 642-646. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.88-89.642>
- [22] Hernandez, A. L. and Quiñonez, J. E. (2013). Analytical models of thermal performance of solar air heaters of double-parallel flow and double-pass counter flow. *Renewable Energy*, 55, 380-391. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.050>
- [23] Zhang, Y., Selamat, A., Zhang, Y., Alrabaiah, H. and Omar, A. H. (2022). Artificial neural networks/least squares fuzzy system methods to optimize the performance of a flat-plate solar collector according to the empirical data. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102062. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102062>
- [24] Hajabdollahi, H., Khosravian, M. and Dehaj, M. S. (2022). Thermo-economic modeling and optimization of a solar network using flat plate collectors. *Energy*, 244, 123070. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123070>
- [25] Abu-Hamdeh, N. H., Khoshaim, A., Alzahrani, M. A. and Hatamleh, R. I. (2022). Study of the flat plate solar collector's efficiency for sustainable and renewable energy management in a building by a phase change material: Containing paraffin-wax/Graphene and Paraffin-wax/graphene oxide carbon-based fluids. *Journal of Building Engineering*, 57, 104804. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104804>
- [26] Reichl, C., Kramer, K., Thoma, C., Benovsky, P. and Lemée, T. (2015). Comparison of modelled heat transfer and fluid dynamics of a flat plate solar air heating collector towards experimental data. *Solar Energy*, 120, 450-463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.011>
- [27] Badache, M., Rousse, D., Hallé, S., Quesada, G. and Dutil, Y. (2012). Experimental and two-dimensional numerical simulation of an unglazed transpired solar air collector. *Energy Procedia*, 30, 19-28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.004>
- [28] Mustafa, M. T. and Mustafa, A. T. (2018). Numerical Simulation of Thermal-Hydrodynamic Behavior within Solar Air Collector. *Journal of Engineering*, 24(3), 29-41. doi: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2018.03.03>
- [29] Orszag, S. A. (1993). Renormalisation group modelling and turbulence simulations. *Near-wall turbulent flows*. <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCF%3ACN003216810/Renormalization-group-modeling-and-turbulence-simulations/>
- [30] Hernández, A. L., Quiñonez, J. E. and López, F. H. (2019). Transient numerical study of thermo-energetic performance of solar air heating collectors with metallic porous matrix. *Solar Energy*, 178, 181-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.035>
- [31] Kareem, M. W., Habib, K., Sopian, K. and Ruslan, M. H. (2017). Multi-pass solar air heating collector system for drying of screw-pine leaf (*Pandanus tectorius*). *Renewable Energy*, 112, 413-424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.069>
- [32] Rekha, L., Vazhappilly, C. V. and Melvinraj, C. R. (2016). Numerical simulation for solar hybrid photovoltaic thermal air collector. *Procedia Technology*, 24, 513-522. doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.088>
- [33] Orbegoso, E. M., Saavedra, R., Marcelo, D. and La Madrid, R. (2017). Numerical characterisation of one-step and three-step solar air heating collectors used for cocoa bean solar drying. *Journal of environmental management*, 203, 1080-1094. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.015>
- [34] Salvo, A., Dellicompagni, P., Sarmiento, N., Franco, J. and Echazú, R. (2018). Simulación y validación de un secadero solar directo pasivo mediante simulol. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 73-83. <https://portaldervistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1197>



- [35] Saravia, L., Alía de Saravia, D., Echazú, R. and Alcorta, G. (2007). La simulacion de sistemas termomecánicos solares con el programa simusol, el motor stirling: simulacion y construcción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/92501>
- [36] Haghghat, F. (1988). Numerical simulation of the performance of an air heating solar collector. *International journal of ambient energy*, 9(3), 135-148. doi: <https://doi.org/10.1080/01430750.1988.9675926>
- [37] Bashria, A., Yousef, A., Adam, N. M., Sopian, K., Zaharim, A. and Alghoul, M. (2007). Analysis of single and double passes V-grooves solar collector with and without porous media. *Int. J. Energy Environ*, 2(1), 109-114. [https://www.researchgate.net/publication/241906626\\_Analysis\\_of\\_Single\\_and\\_Double\\_Passes\\_V-Grooves\\_Solar\\_Collector\\_With\\_and\\_Without\\_Porous\\_Media](https://www.researchgate.net/publication/241906626_Analysis_of_Single_and_Double_Passes_V-Grooves_Solar_Collector_With_and_Without_Porous_Media)
- [38] Bergman, T. L. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons. <https://hyominsite.files.wordpress.com/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf>
- [39] Kays, W. M., Crawford, M. E. and Weigand, B. (1980). *Convective heat and mass transfer* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill. <https://search.worldcat.org/fr/title/54024127>
- [40] Iriarte, A., Rodríguez, C., Bistoni, S. and Hall, M. (2014). Simulación de un secadero solar tendalero túnel. caracterización y optimización. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 18, 9-18. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1997>
- [41] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T. (1992). Runge-kutta method. *Numerical recipes in Fortran: The art of scientific computing*, 704-716.
- [42] Liu, C., Bian, J., Zhang, G., Li, D. and Liu, X. (2018). Influence of optical parameters on thermal and optical performance of multi-layer glazed roof filled with PCM. *Applied Thermal Engineering*, 134, 615-625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.117>
- [43] Liu, C., Wu, Y., Li, D., Ma, T., Hussein, A. K. and Zhou, Y. (2018). Investigation of thermal and optical performance of a phase change material-filled double-glazing unit. *Journal of Building Physics*, 42(2), 99-119. doi: <https://doi.org/10.1177/1744259117707873>
- [44] Ghiami, A. and Ghiami, S. (2018). Comparative study based on energy and exergy analyses of a baffled solar air heater with latent storage collector. *Applied Thermal Engineering*, 133, 797-808. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.111>
- [45] Kabeel, A. E., Hamed, M. H., Omara, Z. M. and Kandeal, A. W. (2018). Influence of fin height on the performance of a glazed and bladed entrance single-pass solar air heater. *Solar Energy*, 162, 410-419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.037>
- [46] Karim, M. A. and Hawlader, M. N. A. (2006). Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors. *Energy*, 31(4), 452-470. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.007>
- [47] A. S. H. R. A. E. (1977). Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. *American Society of Heating*, 93-77.
- [48] Espinoza, R. and Saravia, L. (2010). *Secado solar de productos agroalimentarios en Iberoamérica*. Gráfico Editorial.
- [49] SEREE. (2021). *Sistema de información geográfica: Mapa eólico nacional*. Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética. <https://sigeolico.energia.gob.ar/>
- [50] Kareem, M. W., Habib, K., Sopian, K. and Irshad, K. (2016). Performance evaluation of a novel multi-pass solar air heating collector. *Procedia engineering*, 148, 638-645. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.528>
- [51] Zhu, T., Diao, Y., Zhao, Y. and Ma, C. (2017). Performance evaluation of a novel flat-plate solar air collector with micro-heat pipe arrays (MHPA). *Applied Thermal Engineering*, 118, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.076>

## Desempeño fisiológico de semillas de sorgo dulce en respuesta a la aplicación de retardantes de crecimiento

Deisy Lorena Flórez-Gómez<sup>1</sup>, John Freddy Rodríguez-Molina<sup>2</sup>, David Napoleón Vargas-Ramírez<sup>2</sup>,  
Luisa Fernanda Sarmiento-Moreno<sup>1</sup>, Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo<sup>1</sup>, Manuel Alfonso Patiño-Moscoso<sup>1</sup>, Karen Viviana Osorio-Guerrero<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Sede Central, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

<sup>2</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

\*Autor para correspondencia: [kosorio@agrosavia.co](mailto:kosorio@agrosavia.co)

## Physiological performance of Sweet Sorghum seeds in response to Growth Retardant application

### Abstract

One of the agronomic management strategies to reduce plant lodging during the production of quality sweet forage *sorghum* seed is the use of growth retardants; however, its effect on the physiological performance of the seeds is unknown. The objective of this study was to evaluate the physiological quality of sweet forage *sorghum* seeds obtained after the application of growth retardants in the vegetative state of the plant in two cultivation environments. The trials were established in two locations located in the agroecological zones: inter-Andean valleys and Colombian dry Caribbean during the first semester of 2022. The experimental design used was a randomized complete block with three repetitions and six treatments consisting of the application of variable doses of ethephon, mepiquat chloride and trinexapac-ethyl in two stages of development of the plant (1 and 3) plus the control without the application of retardants. The variables of germination percentage, viability by tetrazolium and vigor by accelerated aging, electrical conductivity and cold test were determined. The average values of germination and viability were 64 % and 80 % respectively. The vigor by accelerated aging and the cold test obtained an approximate value of 62 %. The results indicate that there are effects of the environment and its interaction with the retardants without affecting the physiological performance of the seeds. The existing variability in the physiological parameters of *sorghum* seeds is due to adverse environmental conditions towards physiological maturity and harvest.

**Keywords:** *Sorghum bicolor* L., trinexapac-ethyl, ethephon, mepiquat chloride, vigor, germination.

### Resumen

Una de las estrategias de manejo agronómico para disminuir el volcamiento de plantas durante la producción de semilla de calidad de sorgo dulce forrajero es el uso de retardantes de crecimiento; no obstante, se desconoce su efecto sobre el desempeño fisiológico de las semillas. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad fisiológica de semillas de sorgo dulce forrajero obtenidas posterior a la aplicación de retardantes de crecimiento en estado vegetativo de la planta en dos ambientes de cultivo. Los ensayos se establecieron en dos localidades ubicadas en las zonas agroecológicas: valles interandinos y Caribe seco



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Mateo Dávila

Recibido /  
Received:  
15/06/2023

Aceptado /  
Accepted:  
01/05/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
14/05/2024



colombiano, durante el primer semestre de 2022. El diseño experimental de campo utilizado fueron bloques completos al azar con tres repeticiones y seis tratamientos consistentes en la aplicación de dosis variables de etefón, cloruro de mepiquat y trinexapac-etil en dos estados de desarrollo de la planta (1 y 3), más el testigo sin aplicación de retardantes. Se determinaron las variables de porcentaje de germinación, viabilidad por tetrazolio y vigor por envejecimiento acelerado, conductividad eléctrica y prueba de frío. Los valores promedio de germinación y viabilidad fueron del 64 % y 80 % respectivamente. El vigor por envejecimiento acelerado y la prueba de frío obtuvo un valor aproximado de 62 %. Los resultados indican que existen efectos del ambiente y su interacción con los retardantes sin afectar el desempeño fisiológico de las semillas. La variabilidad existente en los parámetros fisiológicos de las semillas de sorgo obedece a las condiciones ambientales adversas hacia la madurez fisiológica y la cosecha.

**Palabras clave:** *Sorghum bicolor* L., trinexapac-etil, etefón, cloruro de mepiquat, vigor, germinación.

---

## INTRODUCCIÓN

El sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, gracias a su adaptación dentro de áreas con poca lluvia o acceso limitado al agua de riego. En su forma natural, es una planta de gran porte que puede crecer más de 1.8 metros de altura. Tiene varios usos, como biocombustible y en alimentación de animales, como aves y ganado, por su alto rendimiento en biomasa y azúcar [1]. En su uso como forraje, representa una excelente alternativa por el contenido de materia seca, por su valor nutritivo y por su potencial para producir más de dos cortes a intervalos de varias semanas, lo que permite su uso en pastoreo, henificado o ensilado, superando incluso a cultivos de uso frecuente como el maíz en rendimiento [2,3].

Cabe resaltar que, a pesar del valor conocido del sorgo dulce, la producción de semilla de este cultivo representa un desafío debido a su altura y a la estructura de la planta. El bajo contenido de fibra en los tallos, que favorece la digestibilidad en los animales y las condiciones climáticas adversas, así como fuertes lluvias y vientos, pueden provocar el volcamiento o acame de las plantas en periodos críticos como el reproductivo (cercano a la cosecha), afectando el rendimiento, la semilla y la calidad fisiológica y sanitaria de esta [4].

La calidad de la semilla se define por un conjunto de cualidades deseables en sus componentes físico, genético, fisiológico y sanitario [5]. Una semilla de buena calidad debe presentar alto grado de pureza genética, ser vigorosa y viable, estar libre de plagas, patógenos y daños mecánicos, tener un tamaño uniforme y una excelente apariencia, y poseer una humedad óptima para garantizar su adecuado almacenamiento [6]. A nivel fisiológico, la calidad se relaciona con varios factores, tales como la cantidad de reservas, la proporción de proteína, el tamaño del embrión y la eficiencia de los sistemas enzimáticos presentes en la semilla [7].

Los atributos de calidad de una semilla a nivel fisiológico se evalúan principalmente de acuerdo con su vigor y germinación, que pueden verse reducidos por condiciones



desfavorables durante el desarrollo del cultivo en campo y en el proceso de almacenamiento de la cosecha [8,9]. La velocidad de germinación y el vigor están relacionados con los procesos respiratorios de los granos; los cuales, aún cosechados, tienen actividad respiratoria y puede producirse de forma aeróbica o anaeróbica, dependiendo de las condiciones donde se encuentre almacenada. Los procesos y la velocidad de respiración se ven altamente afectados por variaciones en la temperatura, el contenido de humedad, el estado fitosanitario de la cosecha y la composición del aire (relación entre gas carbónico y oxígeno), razones por las que se produce pérdida de peso y calentamiento en los granos que, posteriormente, generan un deterioro acelerado de la semilla y ambientes propicios para el desarrollo de hongos y ataque de insectos [10].

Trabajos previos en semillas de sorgo han determinado que los factores que afectan mayormente la germinación son los cambios bruscos de temperatura y humedad relativa, ya que aceleran el metabolismo de la semilla y los procesos de respiración, por lo que la viabilidad y la calidad de esta se deteriora con el paso del tiempo [11,12,13]. Para preservar la calidad de las cosechas es indispensable contar con un buen sistema de almacenamiento que permita conservar los atributos de calidad. Granos con humedades entre 11 % y 13 % tienen procesos respiratorios lentos que favorecen sus procesos de conservación y un lento deterioro [14]. Así mismo, altos contenidos de humedad favorecen la proliferación de hongos que pueden sobrevivir durante mucho tiempo, reduciendo el poder germinativo y el vigor de las semillas, ocasionando que las raíces se pudran y aparezcan otras enfermedades en las plantas [10].

La aplicación de retardantes de crecimiento se ha utilizado como un método para mejorar algunas cualidades del material vegetal. Estudios han demostrado su éxito para incrementar la producción en tomate (*Solanum lycopersicum*) [15], aumentar el porcentaje y velocidad de germinación de badea (*Passiflora quadrangularis*) [16], y promover la ruptura de la latencia en semillas que la presentan, lo que permite la germinación y el crecimiento del embrión [17].

Los efectos fisiológicos que se pueden producir en las plantas con la aplicación de hormonas vegetales dependerán del mecanismo de interferencia que estas tengan y del lugar donde se sintetizan. A la fecha se conocen cinco grupos de fitohormonas: auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico y etileno; y cada ruta modifica características de importancia en el desarrollo normal de la planta [18]. Una de las características que más se ha buscado modificar con la aplicación de retardantes de crecimiento es la altura, obteniéndose buenos resultados en diferentes especies, ya que, en su mayoría, estos actúan como inhibidores de la biosíntesis de giberelinas, lo que genera alturas inferiores a las que normalmente una planta puede presentar [19].

El volcamiento o acame de las plantas es un fenómeno recurrente en los procesos de producción de semilla. Este puede contrarrestarse con el uso de retardantes de crecimiento, los cuales mejoran la arquitectura de la planta y favorecen la captura de radiación solar y otros recursos ambientales. A la vez, mejoran la partición de foto asimilados, el llenado de la semilla y, consecuentemente, la calidad fisiológica de la misma [20].

Moléculas como el trinexapac-etil y el cloruro de mepiquat, que son parte del grupo de giberelinas, funcionan como una opción tecnológica que inactiva principalmente





el crecimiento del tallo, la elongación de entrenudos y ha demostrado tener un efecto positivo comprobado en algunas plantas en la acumulación de contenido de sacarosa. Un ejemplo es la caña de azúcar medida en kg/azúcar/tonelada de caña cosechada [21]. El etefón o etileno que modifica el metabolismo de las auxinas es usado experimentalmente con fines múltiples como: rompimiento de dormancia, brotaciones, inducción floral, maduración de frutos o semillas [22].

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad fisiológica de semillas de sorgo dulce forrajero obtenidas mediante la aplicación de retardantes de crecimiento en dos ambientes de cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del experimento



**Figura 1.** Localización del experimento. Arriba: Centro de Investigación Naitama ubicado en el valle cálido del Alto Magdalena, municipio El Espinal, departamento de Tolima. Abajo: Centro de Investigación Motilonia ubicado en el Caribe seco colombiano, municipio Agustín Codazzi, departamento del César. Imágenes tomadas de Google Maps (s.f.). Ver el mapa en: <https://maps.app.goo.gl/vR2GTE35U5cjoJA9>, <https://maps.app.goo.gl/o7J6Mg6fwMHRbnD9>.



Los ensayos de producción de semilla de sorgo forrajero fueron sembrados en dos localidades contrastantes en centros de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]. La primera localidad corresponde al Centro de Investigación Nataima, ubicado en el valle cálido del Alto Magdalena, municipio El Espinal, departamento de Tolima, con ubicación geográfica 04° 11' 18.35" de latitud norte y 74° 57' 32.73" de longitud oeste, a una altitud de 371 msnm y con topografía plana (pendiente menor al 3 %). La segunda localidad corresponde al Centro de Investigación Motilonia, ubicado en el Caribe seco colombiano, en el municipio de Agustín Codazzi, departamento del César, con coordenadas geográficas: 9°59'18" de latitud norte y 73°16'21" de longitud oeste, una altitud de 91 msnm y topografía plana (pendiente menor al 3 %). La localización del experimento se puede ver en la figura 1.

## Material vegetal

La variedad de sorgo dulce forrajero Corpoica JYT 18 fue la seleccionada para este estudio, ya que agronómicamente sobresale con rendimientos promedio de 45 t. ha<sup>-1</sup> de forraje verde y concentración de sólidos solubles totales que oscilan de 13,0 a 16,7 °brix, lo que la hace una variedad altamente demandada para la suplementación nutricional, sobre todo en la ganadería bovina [23,24,25].

El cultivar fue sembrado considerando una densidad poblacional para producción de semilla de 75.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Además, el plan de fertilización se basó en los requerimientos nutricionales del cultivo y en los análisis químicos del suelo para cada localidad. Por su parte, el control de arvenses, y el manejo fitosanitario del cultivo se llevó a cabo con la implementación de las técnicas de manejo integrado recomendadas para cada localidad y desarrolladas por AGROSAVIA.

## Aplicación de retardantes en campo

Los ensayos de campo se establecieron bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones y se evaluaron seis tratamientos. En total se establecieron en cada localidad dieciocho unidades experimentales, las cuales se constituyeron en parcelas de seis surcos de diez metros de largo y con una separación entre surcos de 0,8 m para un área de 48 m<sup>2</sup>. Los tratamientos evaluados consistieron en la aplicación de: T1- Cloruro de mepiquat (100 g i.a. ha<sup>-1</sup>), T2- Etefón (720 g i.a. ha<sup>-1</sup>), T3- Etefón (1200 g i.a. ha<sup>-1</sup>), T4- Cloruro de mepiquat (25 g i.a. ha<sup>-1</sup>) + Etefón (360 g i.a. ha<sup>-1</sup>), T5- Trínexapac-etil (200 g i.a. ha<sup>-1</sup>) y T6 que correspondió al testigo sin aplicación de retardantes de crecimiento. Los productos se aplicaron en los estados de desarrollo vegetativos 1, tres hojas desarrolladas antes del primordio foliar, y 3, diferenciación del ápice de crecimiento durante la diferenciación floral.

## Variables evaluadas

### Condiciones ambientales

Durante el periodo de evaluación de los ensayos en campo se registraron diariamente las variables de precipitación y temperatura. Para el cálculo de los excesos y déficit hídricos se utilizó el modelo de balance hídrico propuesto por Allen et al. [26], al igual





que la evapotranspiración real considerando los coeficientes de cultivo (Kc) reportados por el mismo autor. Adicionalmente se empleó la información de las estaciones meteorológicas ubicadas en cada localidad.

### Calidad fisiológica

Una vez finalizada la cosecha a los 120 días después de emergencia se realizó el proceso de beneficio de semillas por cada uno de los tratamientos de campo en cada localidad. Seguidamente, se enviaron al laboratorio de producción vegetal, en el área de semillas del C.I. Tibaitatá de AGROSAVIA, que se ubica en el municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca, Colombia. Allí, se establecieron ensayos para determinar la condición fisiológica de cada uno de ellos usando la metodología propuesta por ISTA [27] considerando las siguientes variables:

**Germinación:** para estimar el poder germinativo, se hicieron montajes de semillas sembradas entre papel con cuatro repeticiones de 50 semillas cada una. El papel anchor fue humedecido con agua destilada considerando una relación de 2.5 veces el peso del sustrato (papel). Los rollos de papel se mantuvieron en un cámara de germinación a 25 °C. A los cuatro días se inició con el primer conteo de plantas normales y a los diez días se finalizó dicho conteo junto con el número de plantas anormales, semillas frescas, duras y muertas; para después calcular su proporción porcentual [28].

**Viabilidad:** la capacidad del embrión para producir una planta se determinó a través de la prueba de tetrazolio con cuatro repeticiones de 25 semillas cada una. Las semillas se humedecieron entre papel anchor a 20 °C durante 18 horas. Posteriormente se realizó un corte longitudinal a través del embrión y un cuarto del endospermo. Las semillas se ubicaron en cajas de Petri y se realizó su inmersión en una solución de tetrazolio al 1 %. Luego, se introdujeron en un horno a una temperatura de 30 °C por un lapso de tres horas. Una vez transcurrido el tiempo, las semillas se retiraron del horno, se lavaron con agua y se realizó la incisión transversal para facilitar la observación de la tinción. Siguiendo los criterios establecidos por ISTA [27], se determinó el porcentaje de viabilidad con base en la diferenciación de colores en los tejidos.

**Envejecimiento acelerado:** esta prueba se realizó para determinar el vigor de las semillas, considerando cuatro repeticiones de 50 semillas cada una, por cada uno de los tratamientos. Las semillas se ubicaron en cajas criogénicas que contenían 40 ml de agua y una malla de aluminio sobre la cual se distribuyó la muestra de manera uniforme. Las cajas se sometieron a una temperatura de 42 °C y una humedad relativa superior al 90 % por un periodo de 72 horas. Finalizado el tiempo, se realizó la prueba de germinación siguiendo los lineamientos de la prueba estándar [27].

**Prueba de frío:** para estimar el vigor por medio de esta prueba se siguieron parámetros similares a los del montaje de la prueba de germinación estándar. Se establecieron cuatro repeticiones de 50 semillas cada una, por cada tratamiento. Los rollos de papel humedecidos se ubicaron en condiciones de temperatura de 10 °C por un lapso de siete días. Cumplido este tiempo, los rollos se colocaron bajo condiciones óptimas para su germinación con una temperatura de 25 °C y se realizaron los conteos determinados en la prueba estandarizada de germinación [29].



**Conductividad eléctrica (CE):** el vigor se estimó también mediante esta prueba para calcular el grado de deterioro de la semilla, en la cual se utilizaron cuatro repeticiones de 50 semillas cada una, para cada tratamiento. Posterior al registro del peso de las semillas, estas se sumergieron en vasos de plástico con 50 ml de agua destilada y se mantuvieron a una temperatura de 20 °C. Después de 24 horas de imbibición, se retiraron las semillas de los recipientes para medir la CE por medio de un conductímetro. Los cálculos se expresaron en  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  de semillas [27,30].

### Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron en el programa estadístico R Studio® [31] en donde se comprobaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad y no aditividad con las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, para luego someter los datos al análisis de varianza. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5 %. Para explicar la variación en la respuesta de la variedad en el bloque se empleó el siguiente modelo estadístico lineal:  $Y_{ijk} = \mu + R_i + L_j + (RL)_{ij} + \beta k(\cdot) + \varepsilon_{ijk}$ , donde  $Y_{ijk}$  es igual al resultado promedio de las variables del  $i$ -ésimo retardante obtenido en la  $j$ -ésima localidad y  $k$ -ésima repetición;  $\mu$  equivale a la media general de las variables;  $R_i$  semeja el efecto del  $i$ -ésimo retardante;  $L_j$  es el efecto de la  $j$ -ésima localidad;  $(RL)_{ij}$  indica la interacción entre el  $i$ -ésimo retardante de crecimiento y la  $j$ -ésima localidad,  $\beta k(\cdot)$  corresponde al efecto del bloque en la  $k$ -ésima repetición y en la  $j$ -ésima localidad y  $\varepsilon_{ijk}$  indica el efecto aleatorio del error experimental relacionado al  $i$ -ésimo retardante en la  $j$ -ésima localidad y  $k$ -ésima repetición, de acuerdo con el modelo lineal aditivo. Se realizó, adicionalmente, un análisis multivariado por componentes principales, analizando las variables de calidad fisiológica de semillas y las condiciones ambientales de producción en las dos localidades estudiadas.

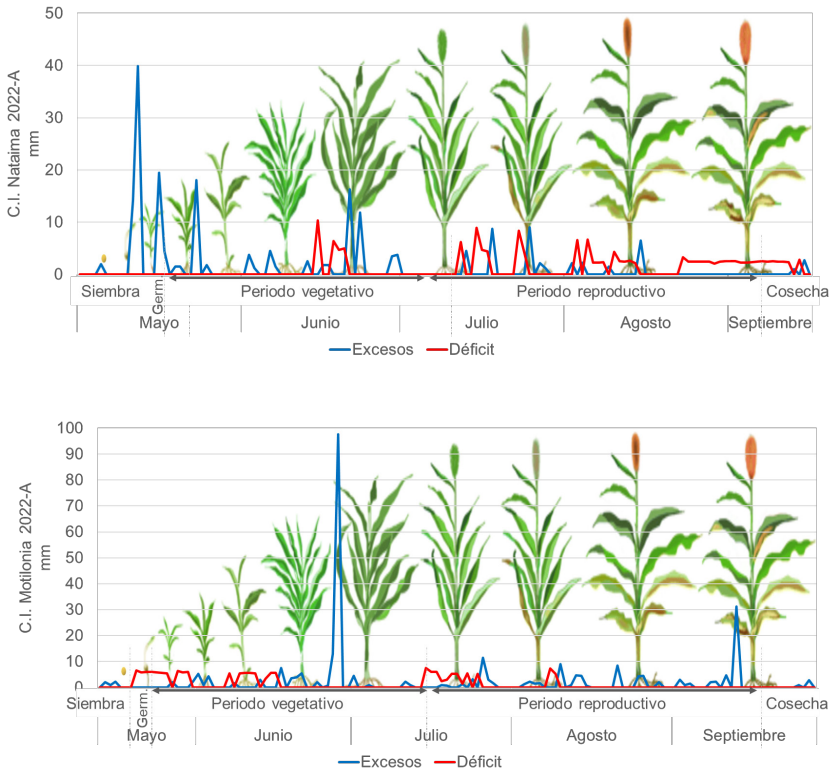
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Condiciones ambientales

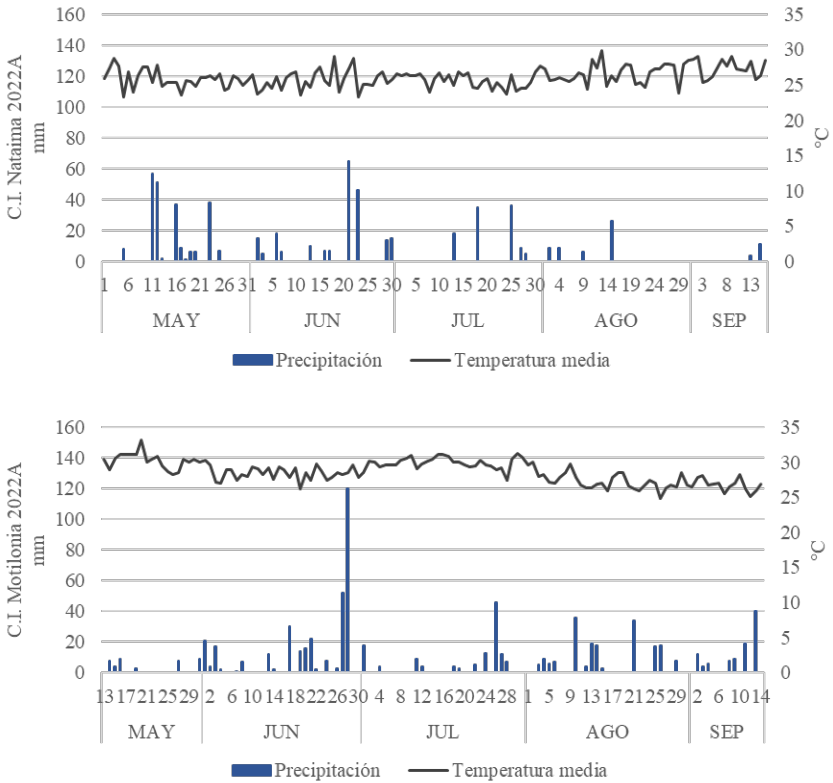
En la figura 2 se pueden observar los balances hídricos que se presentaron durante el ciclo productivo por localidad y, de forma complementaria, en la figura 3 se reflejan las precipitaciones y temperaturas medias diarias de cada ambiente. Se puede detallar que, en general, las dos localidades tuvieron mayor prevalencia de déficit que de exceso de agua, requerimientos que fueron suplidos de acuerdo con las necesidades hídricas de las plantas. No obstante, las altas precipitaciones registradas en la localidad del C.I. Motilonia entre la madurez fisiológica y la cosecha durante el mes de septiembre, suscitaron el volcamiento o acame de las plantas, afectando considerablemente el desempeño fisiológico de las semillas, puesto que las estructuras florales quedan altamente expuestas a daños por humedad, poca captura fotosintética y daños sanitarios [32]. En tal sentido, durante la madurez fisiológica, la semilla alcanza la mayor calidad en términos de viabilidad y vigor; en este momento la semilla se separa fisiológicamente de la planta y es ahí cuando comienza a depender de sí misma, es decir, que en la producción de semillas las condiciones ambientales adversas de excesos hídricos hacia el final del ciclo del cultivo comprometen la calidad final de la semilla obtenida y conllevan a su rápido deterioro y a la disminución de su



calidad fisiológica. Esta información es coherente con los hallazgos de Pecina-Becerril et al. [33], quienes documentaron que las precipitaciones irregulares y poco frecuentes antes de la cosecha de semilla de sorgo en campo afectan directamente el vigor y la tasa de germinación.



**Figura 2.** Balance hídrico del ensayo de retardantes de crecimiento de sorgo en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia durante ciclo fenológico del cultivo en el primer semestre del 2022



**Figura 3.** Precipitaciones y temperaturas medias registras en el ensayo de retardantes de crecimiento de sorgo en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia durante el primer semestre del 2022

Por otro lado, se evidencia que los excesos de humedad durante las etapas tempranas del cultivo, especialmente durante la fase de crecimiento vegetativo, no son limitantes para la calidad de la semilla y el desarrollo de esta. Al contrario, los excesos de precipitación en fases fenológicas críticas, como floración, madurez fisiológica y el periodo previo a la cosecha representan factores de riesgo para la acumulación de carbohidratos estructurales [3], así como también alteraciones en la calidad fisiológica y sanitaria de la semilla [34].

Las condiciones ambientales en las dos localidades, con excepción de los eventos de exceso de precipitación al final del ciclo para el caso del C.I. Motilonia, fueron adecuadas para el desarrollo del cultivo de sorgo en cuanto a requerimientos hídricos y de temperatura. Al respecto, Bueno [35] reporta que el sorgo forrajero necesita lluvias moderadas, de un mínimo de 400 a 450 mm y un óptimo de 600 a 700 mm. En las dos localidades de experimentación se obtuvieron precipitaciones dentro del rango sugerido 796 y 596,8 mm en C.I. Motilonia y C.I. Nataima, respectivamente. En cuanto a la temperatura media, el óptimo se encuentra alrededor de los 27° C y la temperatura de ambas localidades osciló dentro del rango referido para el cultivo.



## Calidad fisiológica de las semillas

Entre los factores que afectan la calidad fisiológica de la semilla se encuentran la composición genética, las condiciones ambientales durante el desarrollo de la semilla y las condiciones de almacenamiento [28,36].

En todas las variables de desempeño fisiológico evaluadas y medidas en los términos de viabilidad y vigor, se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas para las fuentes de variación, la localidad y la interacción entre ambiente y tratamientos (tablas 1 y 2); lo cual sugiere que las diferencias obtenidas, estuvieron determinadas en gran medida por el lugar de producción de la semilla y sus condiciones ambientales, así como por la respuesta del ambiente al tipo de regulador y la dosis utilizada. De acuerdo con los resultados de la comparación de medias de cada localidad, se encontró que el C.I. Nataima tuvo un mejor comportamiento fisiológico en todas las variables evaluadas en comparación al C.I. Motilonia, lo cual se esperaba en vista de las precipitaciones que se presentaron al final del ciclo productivo en esta localidad del Caribe seco.

**Tabla 1.** Cuadros medios del análisis de varianza para las variables de la prueba de germinación estándar y la viabilidad en sorgo forrajero JJT-18 durante el primer semestre del 2022 en dos localidades evaluadas.

Fuente de variación	GL	Germinación (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas muertas (%)	Viabilidad (%)
Localidad (L)	1	3154.69***	90.25**	2384.69***	568.03***
Tratamiento (R)	5	25.65 <sup>ns</sup>	43.16***	11.89 <sup>ns</sup>	57.36*
L x R	5	126.36***	15.12 <sup>ns</sup>	136.43***	140.43***
Error	24	20.83	7.14	7.97	21.86
CV (%)		7.09	20.6	12.95	5.87
Mean		64.42	12.97	21.81	79.69

GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación; \*\*\*, \*\*, \*: diferencias significativas (p<0,001), (p<0,01), y (p<0,05), respectivamente; NS: No significativo

**Tabla 2.** Cuadros medios del análisis de varianza para las variables relacionadas con el vigor de la semilla en sorgo forrajero JJT-18 durante el primer semestre del 2022 en dos localidades evaluadas.

Fuente de variación	GL	Envejecimiento acelerado (%)	Prueba de frío (%)	Conductividad eléctrica (%)
Localidad (L)	1	245.44**	2773.78***	1722.25***
Tratamiento (R)	5	40.87 <sup>ns</sup>	29.98 <sup>ns</sup>	36.98***
L x R	5	116.778*	120.98*	14.85*
Error	24	30.39	43.67	3.97
CV (%)		8.82	10.94	6.66
Mean		62.5	60.39	29.92

GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación; \*\*\*, \*\*, \*: diferencias significativas (p<0,001), (p<0,01), y (p<0,05), respectivamente; NS: No significativo



## Viabilidad de las semillas

Referente a la evaluación de germinación, las semillas provenientes de las dos localidades no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí entre las localidades evaluadas y la interacción. La semilla de los tratamientos evaluados en el C.I. Nataima presentó los valores de germinación más altos en comparación con los del C.I. Motilonia y un coeficiente de variación del 4.3 % y dos grupos de significancia estadística, en donde la aplicación de etefón a su máxima dosis y la mezcla de etefón con cloruro de mepiquat presentaron las menores germinaciones con 68 % y 68.3 % respectivamente, frente al testigo, que tuvo la mayor germinación: 81.3 %. Respecto a la semilla proveniente de los ensayos establecidos en el C.I. Motilonia, el testigo obtuvo la menor germinación, con 50 % en comparación con el tratamiento de etefón de máxima dosis que presentó el mayor porcentaje germinativo: 62 %. Por su parte, el coeficiente de variación en este ambiente fue de 10.1 % (como se ve en la tabla 3).

**Tabla 3.** Comparación de medias para las variables de germinación de la semilla cosechada durante el primer semestre del 2022 en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia.

Localidad	Tratamiento	Germinación (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas muertas (%)
C.I. Nataima	T1	81.0 A	8.0 C	11.0 B
	T2	73.0 AB	10.0 BC	17.0 A
	T3	68.0 B	13.0 AB	19.0 A
	T4	68.3 B	17.0 A	14.7 AB
	T5	73.3 AB	12.3 ABC	14.4 AB
	Testigo	81.5 A	9.5 BC	9.0 B
	C.V. (%)	4.3	17.8	16.42
	Desv. Estándar	5.75	3.75	4.53
C.I. Motilonia	T1	54.0 A	10.0 A	36.0 A
	T2	59.0 A	18.0 A	23.0 B
	T3	62.0 A	14.0 A	24.0 B
	T4	55.0 A	16.0 A	29.0 AB
	T5	51.0 A	15.0 A	34.0 A
	Testigo	50.0 A	15.0 A	35.0 A
	C.V. (%)	11.6	24.59	19.15
	Desv. Estándar	6.4	3.63	5.83

\*Medias con letras iguales en sentido vertical no son estadísticamente diferentes con  $P < 0.05$  (prueba de Tukey).

La germinación de genotipos de sorgo ha sido reportada como afectada por altas precipitaciones durante la etapa de llenado de grano y madurez fisiológica [33]. Es importante destacar que los porcentajes de germinación de la semilla procedente del C.I. Nataima se encontraron cercanos al 80 %, valor mínimo reglamentario para la comercialización de semilla certificada en la normatividad nacional de Colombia [37], mientras que los del C.I. Motilonia no alcanzaron este umbral mencionado.



La viabilidad de las semillas obtenidas presentó diferencias altamente significativas por la interacción del ambiente de producción más que por la acción de los tratamientos, siendo mayor en las semillas producidas en el C.I. Nataima, debido a las condiciones de baja humedad durante las etapas de madurez fisiológica y de cosecha (tabla 4). En contraste, en el C.I. Motilonia se presentaron lluvias continuas y alta humedad relativa al final del ciclo productivo, lo que pudo inferir en la obtención de menores valores de viabilidad reportados para esta localidad.

**Tabla 4.** Comparación de medias para las variables de viabilidad y vigor de la semilla cosechada durante el primer semestre del 2022 en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia.

Localidad	Tratamiento	Viabilidad (%)	Envejecimiento acelerado (%)	Prueba de frío (%)	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ )
C.I. Nataima	T1	86.7 A	71.0 A	72.3 A	23.1 A
	T2	76.0 B	55.7 A	64.7 A	24.4 A
	T3	88.0 A	62.0 A	71.0 A	23.2 A
	T4	81.0 AB	65.3 A	66.0 A	23.2 A
	T5	88.0 A	65.7 A	70.3 A	25.2 A
	Testigo	82.3 AB	71.0 A	70.7 A	21.2 A
	C.V. (%)	4.3	10	7.4	6.7
	Desv. Estándar	5.28	7.52	4.9	1.99
C.I. Motilonia	T1	65.0 B	59.0 A	40.0 A	36.4 A
	T2	84.0 A	61.7 A	57.0 A	37.5 A
	T3	76.0 AB	65.0 A	52.3 A	34.6 A
	T4	75.7 AB	63.7 A	57.0 A	34.0 A
	T5	80.7 AB	54.0 A	49.3 A	45.0 A
	Testigo	73.0 AB	56.0 A	54.0 A	36.2 A
	C.V. (%)	8	7.8	13.8	6.6
	Desv. Estándar	7.8	5.71	9.06	4.18

\*Medias con letras iguales en sentido vertical no son estadísticamente diferentes con  $P < 0.05$  (prueba de Tukey).

Según Copeland y McDonald [28], variaciones contrastantes en las condiciones climáticas pueden causar el deterioro de las semillas, así como disminuir su viabilidad y vigor. Esta afirmación concuerda con la variación en la germinación y la viabilidad de las semillas de ambas localidades, la cual pudo verse afectada de igual manera por las altas precipitaciones que se presentaron durante la etapa previa a la cosecha en donde se produce la madurez de la semilla, ocasionando altos contenidos de humedad que conllevan a la reducción en la calidad y el deterioro de esta.

Además de la selección del tiempo de cosecha, el grado de madurez de la semilla de sorgo es uno de los factores que se relaciona en gran medida con su germinación y vigor. Por consiguiente, la semilla de cosecha tardía, como aquella que no está completamente desarrollada y cuyo embrión es inmaduro, contribuyen al proceso de senescencia,



dada la inhibición de enzimas que son responsables de la movilización de reservas de almacenamiento que aseguran la germinación y el crecimiento de las plántulas [38].

## Vigor de las semillas

Los resultados obtenidos durante las evaluaciones del vigor de las semillas de cada tratamiento y sometidas a condiciones de estrés no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí entre las localidades:  $p < 0,01$  y  $p < 0,001$  para las pruebas de envejecimiento acelerado y prueba de frío, respectivamente. Estas evaluaciones sugieren que las semillas procedentes del C.I. Nataima tendrían un mejor comportamiento en campo frente a condiciones adversas en comparación con las semillas producidas en el C.I. Motilonia. Además, se evidenció con estas pruebas que las semillas sometidas a estos tratamientos y bajo estas condiciones tienen menor tolerancia a condiciones de almacenamiento inadecuadas o exposiciones prolongadas a situaciones de estrés.

En contraste con las pruebas anteriores, la conductividad eléctrica mostró diferencias significativas entre tratamientos, localidades e interacción ( $p < 0,001$ ). Los valores medios para la localidad del C.I. Nataima fue de  $23.4 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  en comparación con los del C.I. Motilonia que oscilan en promedio de  $37.3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ . Las diferencias encontradas, pueden deberse a que esta prueba es altamente sensible y permite evaluar la integridad de las membranas celulares de la semilla, teniendo en cuenta que son las últimas estructuras en formarse durante la fase del desarrollo en la madurez fisiológica y las primeras en deteriorarse, lo cual genera datos contrastantes y por lo tanto diferenciadores.

El momento oportuno de cosecha es el factor más determinante en la calidad de semillas de sorgo; es así que el exceso de lluvias hacia el final del ciclo del cultivo lleva a la cosecha de semillas con alta humedad, desencadenando una respuesta fisiológica perjudicial que afecta drásticamente la integridad de las membranas celulares de las mismas [39].

Los resultados encontrados, tanto en viabilidad como en vigor de la semilla, fueron similares a los obtenidos por Ochieng [40] al evaluar la calidad fisiológica de semillas de sorgo en dos localidades. Se encontraron diferencias en función de la procedencia de la semilla, siendo superior la de la localidad con menor régimen de lluvias; datos acordes a los resultados de la localidad del C.I. Nataima. La viabilidad puede verse afectada por diversas circunstancias durante la etapa de producción, como ataque de plagas, la eficiencia en las estructuras vegetativas para interceptación de luz y la transferencia de nutrientes al grano [41]. Por otro lado, durante la poscosecha, el desempeño fisiológico puede ser menor debido al secado rápido a altas temperaturas y el almacenamiento inadecuado [42,43].

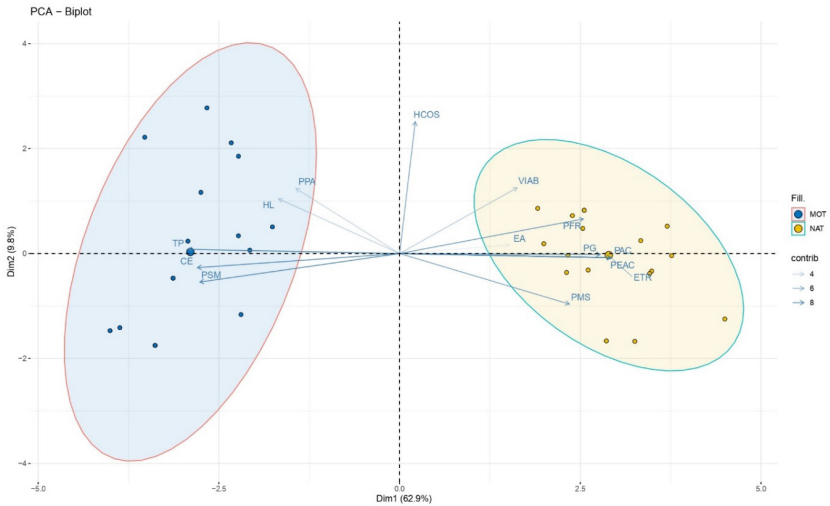
Un lote de semillas con un alto vigor se caracteriza por una buena germinación y un rápido crecimiento de las plántulas [44]. La disminución del vigor es consecuencia del deterioro de las semillas a causa de factores adversos como cosechas tardías o excesos de lluvias durante la madurez y la cosecha [43]. En este sentido, el deterioro en gramíneas inicia en las células de la radícula y se extiende hacia el escutelo [45], afectando las membranas de las mitocondrias y la producción de energía de las células, lo que se traduce en una baja calidad fisiológica de la semilla [46]. La pérdida de viabilidad es el último indicador de deterioro antes de la muerte de la semilla [47].





## Análisis de componentes principales

Los resultados del análisis de componentes principales se presentan en la figura 4. En el *biplot*, los puntos representan cada una de las muestras de 50 semillas y los vectores representan las variables de calidad fisiológica y las condiciones ambientales medidas durante la etapa de madurez fisiológica. Las muestras de las dos localidades de estudio se agrupan en diferentes regiones, lo que indica que la semilla cosechada exhibe una variabilidad en la calidad fisiológica que puede estar relacionada con las variables ambientales medidas en este estudio.



**Figura 4.** Análisis de componentes principales de variables fisiológicas y ambientales analizadas de la semilla cosechada durante el primer semestre del 2022 en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia.

El primer eje principal del *biplot* explica el 62.9 % de la variabilidad en los datos y está fuertemente correlacionado con las variables de viabilidad (VIAB), prueba de frío (PFR), envejecimiento acelerado (EA), porcentaje de germinación (PG), porcentaje de plantas anormales (PPA), humedad en laboratorio (HL), conductividad eléctrica (CE), porcentaje de semillas muertas (PSM), variables ambientales como evapotranspiración (ETR), temperatura (TP) y precipitación durante la etapa de madurez fisiológica (PAC y PEAC). El segundo eje principal explica el 9.8 % de la variabilidad en los datos y está correlacionado con el contenido de humedad de la semilla al momento de la cosecha (HC).

Las variables fisiológicas PMS, VIAB, PFR, EA y PG están correlacionadas positivamente con las variables ambientales PAC, PEAC y ETR. Lo anterior indica que el número de semillas germinadas y viables, incluso después de ser sometidas a condiciones de estrés, aumenta cuando la precipitación acumulada durante la etapa de madurez fisiológica es menor y disminuye cuando la temperatura promedio durante la etapa de madurez fisiológica es mayor. Por su parte, Ellis y Yadav [48] reportan una disminución en la longevidad de la semilla por un aumento de la lluvia durante el desarrollo de esta, la cual



puede ser reversible. De igual modo, Msongaleli [49] concluye que variedades mejoradas de sorgo presentan atributos de calidad deficientes de semilla cuando las plantas se someten a condiciones de estrés hídrico.

Así mismo, la correlación positiva entre las variables fisiológicas PPA, HL, CE y PSM con la variable ambiental TP parece indicar que una mayor temperatura durante la etapa de maduración fisiológica y un mayor contenido de humedad de la semilla afectan negativamente la calidad fisiológica de estas. En este sentido, es posible inferir que, cuando hay suficiente humedad para que el cultivo de sorgo complete su ciclo, una precipitación adecuada en la etapa de madurez fisiológica, pero una menor temperatura y un menor contenido de humedad en postcosecha, son esenciales para obtener una mejor calidad de la semilla expresada en una mayor viabilidad y longevidad.

## CONCLUSIONES

Las aplicaciones de retardantes de crecimiento en la producción de semilla de sorgo dulce forrajero no afectaron la germinación de las semillas provenientes de los tratamientos evaluados en ambas localidades. La respuesta del comportamiento fisiológico de la semilla se determinó, en gran medida, por las condiciones ambientales de alta precipitación que predominaron durante todo el desarrollo del cultivo. Se presentaron mayores precipitaciones en etapas de madurez del grano, lo que comprometió, en forma significativa, la respuesta fisiológica de las semillas. Por lo mismo, es propicio tener en cuenta las fechas de siembra adecuadas para mitigar posibles efectos por precipitaciones altas hacia el periodo de madurez y cosecha. Finalmente, se concluyó que altas humedades en la semilla llevan a un deterioro acelerado de las mismas.

La evaluación de germinación es la prueba más representativa y con validez normativa para la comercialización de semillas. Sin embargo, la prueba de conductividad eléctrica ofrece información de la composición interna de la semilla, lo que permite tomar decisiones para el manejo en campo y el almacenamiento de estas por periodos de tiempo más prolongados.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), a los Centros de Investigación Nataima, Motilonia y Tibaitatá y, en especial, a su Dirección de Vinculación y al Departamento de Semillas por su participación y financiación en el marco del proyecto “Conservación y producción de semilla y material vegetal de calidad para las Ofertas Tecnológicas corporativas de AGROSAVIA con el fin de activar procesos de escalamiento y vinculación comercial (Fase III)”.



## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Flórez-Gómez, D. F. diseñó los experimentos, participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y en la captura de datos, realizó el análisis estadístico, interpretó los resultados, contribuyó a la redacción y en la revisión final del manuscrito. Rodríguez-Molina, J. F. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y captura de datos, interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito. Vargas-Ramírez, D. N. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y contribuyó a la redacción del manuscrito. Sarmiento-Moreno, L. F. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y contribuyó a la redacción del manuscrito. Rodríguez-Yzquierdo, G. A. interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito y la revisión final del mismo. Patiño-Moscoso, M. A. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio, interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito y la revisión final del mismo. Osorio-Guerrero, K. V. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio, interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito, ajustes y revisión final del mismo.

## CONFLICTO DE INTERÉS

El manuscrito fue elaborado y revisado por todos los autores, quienes declaran la ausencia de cualquier conflicto que pueda poner en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

- [1] Getachew, G., Putnam, D. H., De Ben, C. M. y De Peters, E. J. (2016). Potencial del sorgo como alternativa al forraje de maíz. *American Journal of Plant Sciences*, 7, 1106-1121. doi: <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.77106>
- [2] Nava, C., Rosales, R., Jiménez, R., Carrete, F., Domínguez, P. y Murillo, M. (2017). Rendimiento y valor nutricional de tres variedades de sorgo dulce cultivadas en cuatro ambientes de Durango. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 8(2). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11242017000200147](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242017000200147)
- [3] Pérez, A., Quero, A., Escalante, J., Rodríguez, M., Garduño, S. y Miranda, L. (2018). Fenología, biomasa y análisis de crecimiento de cultivares de sorgo forrajero en valles altos. *Agronomía Costarricense*, 42(2), 107-117. doi: <https://doi.org/10.15517/rac.v42i2.33782>
- [4] Kamran, M., Ahmed, I., Wang, H., Wu, X., Xu, J., Liu, T., Ding, R. y Han, Q. (2018). La aplicación de cloruro de mepiquat aumenta la resistencia al acame del maíz al mejorar la resistencia física del tallo y la biosíntesis de lignina. *Investigación de cultivos extensivos*, 224, 148-159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429018301114>
- [5] Farrás, T. (2018). Calidad de semilla: qué implica y cómo determinarla. *Plan agropecuario*, (166), 64-65. [https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/180\\_2775.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/180_2775.pdf)
- [6] Bacarrillo, M. G. (2008). *Calidad fisiológica de semilla de sorgo Almun producida bajo diferentes niveles de fertilización*. Universidad Autónoma Agraria.
- [7] Montes, N., González, V. A. y Mendoza, L. (2016). Calidad fisiológica de la semilla de sorgo sometido a defoliación y déficit hídrico. *Agronomía Mesoamericana*, 6, 140. doi: <https://doi.org/10.15517/am.v6i0.24820>
- [8] Miller, B. (1993). La historia de las pruebas de vigor de las semillas. *Stjournal*, 17(2), 93-100. [https://stjournal.org/wp-content/uploads/2015/07/92-100-ST\\_V17N2-1993.pdf](https://stjournal.org/wp-content/uploads/2015/07/92-100-ST_V17N2-1993.pdf)
- [9] Le Coënt, P., Larinde, M., Guei, R., Wobil, J., Fajardo, J., Pandey, S. y Osborn, T. (2011). *Semillas en emergencias: manual técnico*. Estudio FAO producción y protección vegetal. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/29be0477-eb32-4a34-a341-9b75b5ffe577/content>
- [10] Food and Agricultural Organization. (1993). *Manual de manejo postcosecha de granos a nivel rural*. FAO. <https://www.fao.org/4/x5027s/x5027S01.htm#insectos>
- [11] Alfaro, J. L. (2010). *Evaluación de tres sistemas de almacenamiento de semilla de sorgo (Sorghum bicolor) variedad Sureño, en Zamorano* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Escuela Agrícola Panamericana. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/7e1a83af-65e6-4c62-a685-26604ed2dbac/content>
- [12] Erazo, A. (2004). *Deterioro de calidad física y viabilidad de semillas de maíz (Zea mays), frijol (Phaseolus vulgaris), y sorgo (Sorghum bicolor) durante su almacenamiento en Zamorano* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Escuela Agrícola Panamericana. <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2381/1/AGI-2004-T018.pdf>
- [13] López, M. (2017). *Evaluación de tres métodos de almacenamiento y su efecto en la calidad de semilla de sorgo (Sorghum bicolor) variedad Sureño*. [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Escuela Agrícola Panamericana. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1a258ea9-676e-4f26-983a-b962f6724a72/content>
- [14] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Almacenamiento y conservación de granos y semillas*. SAGARPA.
- [15] Ramos-Fernández, J., Ayala-Garay, O. J., Pérez-Grajales, M., Sánchez-del Castillo, F. y Magdaleno-Villar, J. J. (2019). Efecto del paclobutrazol sobre el crecimiento de la planta, rendimiento y calidad del fruto en tomate. *Bioagro*, 33(1), 59-64. doi: <https://doi.org/10.51372/bioagro331.8>
- [16] Carranza, C., Castellanos, G., Deaza, D. y Miranda, D. (2016). Efecto de la aplicación de reguladores de crecimiento sobre la germinación de semillas de badea (*Passiflora quadrangularis* L.) en condiciones de invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 284-291. doi: <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5791>

- [17] Amador, K., Díaz, J., Loza, S. y Egla, B. (2003). Efecto de diferentes reguladores de crecimiento vegetal sobre la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de dos especies de *Ferocactus* (Cactaceae). *Journal of Hubei Agricultural College*, 23(35), 161-163. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5651148#:~:text=Se%20evalu%C3%B3%20el%20efecto%20de%20la%20adici%C3%B3n%20de,las%20especies%20Ferocactus%20histrix%20y%20F.%20latispinus%20%28Cactaceae%29>
- [18] Lluna, R. (2006). Hormonas vegetales: crecimiento y desarrollo de la planta. *Revista horticultura*, 196(2), 22-27. [http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh196\\_2/22\\_27.pdf](http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh196_2/22_27.pdf)
- [19] Sánchez, B. F. (2003). Obtención de plantas ornamentales compactas, mediante la aplicación de Paclobutrazol y podas de formación En: V.G. Almaguer, L. Colinas, M. Flores, A. Mora, L. Vidal, R. González, S. Ayala y M. Mejía (Eds.), *X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas, IX Congreso Nacional y II Internacional de Horticultura Ornamental*.
- [20] De Souza, L. T., Espíndula, M. C., Rocha, V. S., Dias, D. C. F. dos S. y de Souza, M. A. (2010). Growth retardants in wheat and its effect in physiological quality of seeds. *Ciencia Rural*, 40(6), 1431-1434. doi: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782010000600031>
- [21] Espinoza, G., Ramos, F., Coronado, M., Flores, R., Veleche, J., Aguirre, I., Camey, O., Montepeque, R., Sanchez, L., Javier, A., López, A., Escobar, G., Fajardo, P., Duarte, R., Arevalo, M. y Santos, R. (2020). *Efectividad de trinexapac etil 25 ec + boro 17% (b2o3) en el incremento de azúcar aplicado como madurante en caña de azúcar (Saccharum spp.)*. CENGICANA: Memorias presentación resultados de investigación ZAFRA 2019-2020. <https://cengicana.org/files/202007231146463.pdf>
- [22] Costa-Silva, E., Torquato-Tavares, A., Alves-Ferreira, T., Reyes, Pascual-Reyes, I., Guimarães-Alves, F. y Nascimento, Ildon. (2020). Dosis y número de aplicaciones de etefón en la reversión sexual de flores de calabacita. *Revista Chapingo, Serie horticultura*, 26(1), 5-14. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.06.011>
- [23] Corporación colombiana de investigación agropecuaria. (2020). *Sorgo dulce para forraje Corpoica JJT-18*. AGROSAVIA. <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/l%C3%ADnea-pecuaria/ganader%C3%ADa-y-especies-menores/material-reproductivo-vegetal-semillas/302-sorgo-dulce-corpoica-jjt-18>
- [24] Bernal, J. H., Rincón, A., Guevara, E., Hernández, R. y Flórez, H. (2014). Sorgo forrajero Corpoica JJT-18: boletín técnico. CORPOICA. [https://www.researchgate.net/publication/322809434\\_Sorgo\\_forrajero\\_Corpoica\\_JJT-18](https://www.researchgate.net/publication/322809434_Sorgo_forrajero_Corpoica_JJT-18)
- [25] Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2013). *Resolución 4245 del 11 de octubre de 2013 "por la cual se ordena el Registro de la variedad de sorgo forrajero CORPOICA JJT-18 de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA"*. Instituto Colombiano Agropecuario.
- [26] Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Riego y Drenaje*, 56. [https://www.researchgate.net/publication/312841499\\_Evapotranspiracion\\_del\\_cultivo\\_Guias\\_para\\_la\\_determinacion\\_de\\_los\\_requerimientos\\_de\\_agua\\_de\\_los\\_cultivos](https://www.researchgate.net/publication/312841499_Evapotranspiracion_del_cultivo_Guias_para_la_determinacion_de_los_requerimientos_de_agua_de_los_cultivos)
- [27] International Seed Testing Association [ISTA]. (2018). *Introducción a las reglas de ISTA*. Asociación Internacional de Pruebas de Semillas.
- [28] Copeland, L. O. y McDonald, M. (2001). *Principles of Seed Science and Technology*. Springer US. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1619-4>
- [29] Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Córdova-Télez, L., Vaquera-Huerta, H., Mendoza-Castillo, M. del C. y García-de los Santos, G. (2007). Tamaños de semilla, sustancias vigorizantes y pruebas de vigor en sorgos tolerantes al frío. *Agrociencia*, 41(2), 169-179. [https://www.researchgate.net/publication/242580120\\_TAMANOS\\_DE\\_SEMILLA\\_SUBSTANCIAS\\_VIGORIZANTES\\_Y\\_PRUEBAS\\_DE\\_VIGOR\\_EN\\_SORGOS\\_TOLERANTES\\_AL\\_FRIO\\_SEED\\_SIZES\\_INVIGORIZATION\\_SUBSTANCES\\_AND\\_VIGOR\\_TESTS\\_IN\\_COLD\\_TOLERANT\\_SORGHUMS](https://www.researchgate.net/publication/242580120_TAMANOS_DE_SEMILLA_SUBSTANCIAS_VIGORIZANTES_Y_PRUEBAS_DE_VIGOR_EN_SORGOS_TOLERANTES_AL_FRIO_SEED_SIZES_INVIGORIZATION_SUBSTANCES_AND_VIGOR_TESTS_IN_COLD_TOLERANT_SORGHUMS)
- [30] Barros, S., Silva, M. A., Soares, I. M. y Queiróz, M. A. (1999). Correlação entre testes de vigor em sementes de maxixe. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 34(6), 1075-1080. doi: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x1999000600020>
- [31] R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- [32] Hussen, A. (2021). Impacto del método de almacenamiento de granos en la calidad del grano de sorgo en Etiopía: una revisión. *Journal of Current Research in Food Science*, 2(1), 40-45. <https://www.foodresearchjournal.com/>

- [33] Pecina-Becerril, A., Yáñez-López, R., Quijano-Carranza, J. A., Bujanos-Muñiz, R., Andrio-Enriquez, E. y Pecina-Quintero, V. (2021). Producción y calidad de la semilla de sorgo en el Centro de México bajo polinización controlada. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(1), e2079. doi: [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num1\\_art:2079](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2079)
- [34] Egli, D. B. (2017). *Seed Biology and Yield of Grain Crops*. CABI Books. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9781780647708.0000>
- [35] Bueno, G., Cordovés, M. y Delgado, G. (2009). Sorgo dulce: sus potencialidades productivas. *Revista ICIDCA. Sobre sus derivados de la caña de azúcar*, 43(3), 15-21. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120660003.pdf>
- [36] Oliveira, K. R., Sampaio, F. R., Siqueira, G. S., Galvão, Í. M., Bennett, S. J., Gratão, P. L. y Barbosa, R. M. (2021). Physiological quality of soybean seeds grown under different low altitude field environments and storage time. *Plant, Soil and Environment*, 67, 92-98. doi: <https://doi.org/10.17221/512/2020-PSE>
- [37] Instituto Colombiano Agropecuario. (2015). *Resolución No. 003168 del 07 de septiembre de 2015 "Por medio de la cual se reglamenta y controla la producción, importación y exportación de semillas producto del mejoramiento genético para la comercialización y siembra en el país, así como el registro de las unidades de evaluación agronómica y/o unidades de investigación en fitomejoramiento y se dictan otras disposiciones"*. ICA. <https://www.ica.gov.co/getattachment/4e8c3698-8fcb-4e42-80e7-a6c7acde9bf8/2015R3168.aspx>
- [38] Olawamide, D. O., Fayeun, L. S. y Abubakar, S. K. (2020). Effect of Time of Harvest on Seed Quality and Carbohydrate Content of Grain Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] in the Rainforest Agro-Ecology of Nigeria. *Nigerian Journal of Seed Science*, 4(2), 32-43. <https://www.researchgate.net/publication/349251312>
- [39] Ratnavathi, C. V. y Komala, V. V. (2016). Sorghum Grain Quality. *Sorghum Biochemistry: An Industrial Perspective*, pp. 1-61. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803157-5.00001-0>
- [40] Ochieng L. A., Mathenge P. W. y R, Muasya. (2013). Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] seed quality as affected by variety, harvesting stage and fertilizer application in Bomet County of Kenya. *Afric. J. of Food, Agric., Nutri. and Dev.* 13(4), 7905-7926. [https://www.semanticscholar.org/paper/Sorghum-%5BSorghum-bicolor-\(L.\)-Moench%5D-seed-quality-Ochieng-Mathenge/0cfce4c41481ae8374b7eb5479506c444df9790a](https://www.semanticscholar.org/paper/Sorghum-%5BSorghum-bicolor-(L.)-Moench%5D-seed-quality-Ochieng-Mathenge/0cfce4c41481ae8374b7eb5479506c444df9790a)
- [41] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Materiales para capacitación en semillas*. FAO
- [42] Salazar, S. A., y Delgado, E. A. B. (2018). Viabilidad de semillas de *Glycine max* (L.) utilizando la prueba de tetrazolío. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 89-98. [https://www.researchgate.net/publication/326927376\\_Viabilidad\\_de\\_semillas\\_de\\_Glycine\\_max\\_L\\_Utilizando\\_la\\_prueba\\_de\\_tetrazolío](https://www.researchgate.net/publication/326927376_Viabilidad_de_semillas_de_Glycine_max_L_Utilizando_la_prueba_de_tetrazolío)
- [43] Carvajal, C., Márquez, M., Gutiérrez, B., González, V. A., Arellano, J. y Ávila, M. (2017). Aspectos de fisiología, deterioro y calidad en semilla de soya. *Revista Alcance*, 73, 76-92.
- [44] Navarro, M., Febles, G., & Herrera, R. S. (2015). Vigor: essential element for seed quality. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49(4), 447-458. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193045908003.pdf>
- [45] Krzyzanowski, F. C., França-Neto, J. de B. y Dias, D. C. F. dos S. (2022). *Deterioración y vigor de la semilla*. Londrina PR: Embrapa Circular técnica 191.
- [46] Marcos-Filho, J. (2015). *Fisiología de semillas de plantas cultivadas*. Londrina: ABRATES.
- [47] Delouche, J. C. y Baskin, C. (1973). Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. *Seed Science and Technology*, 1, 427-552. <https://www.semanticscholar.org/paper/Accelerated-Aging-Techniques-for-Predicting-the-of-Delouche-Baskin/9f445224edda6941fcfc0a65e1710c50e7de2e>
- [48] Ellis, R. y Yadav, G. (2016). El efecto de la lluvia simulada durante el desarrollo y maduración de la semilla de trigo en la longevidad de la semilla posterior es reversible. *Seed Science Research*, 26(1), 67-76. doi: <https://doi.org/10.1017/S0960258515000392>
- [49] Msongaleli, B. M., Tumbo, S. D., Kihupi, N. I., y Rwehumbiza, F. B. (2017). Desempeño de variedades de sorgo bajo lluvias variables en Tanzania central. *International Scholarly Research Notices*, 2017, 2506946. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/2506946>

## On the use of anthropogenic materials in nest building of House Wren (*Troglodytes aedon*), a report from Parque Los Algarrobos, Cumbayá, Ecuador

Roberto J. León-E.<sup>1</sup>, Ariel Guerrero-Campoverde<sup>1</sup>, Mateo Dávila-Játiva<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales COCIBA, Instituto de Biodiversidad Tropical IBIOTROP, Laboratorio de Zoología Terrestre, Museo de Zoología, Quito 170901, Ecuador

\*Corresponding author: [teodavila@gmail.com](mailto:teodavila@gmail.com)

## El uso de material antropogénico en la construcción de nidos del Sotorrey Común (*Troglodytes aedon*), un reporte desde el Parque Los Algarrobos, Cumbayá, Ecuador

### Resumen

Los nidos, estructuras críticas para el desarrollo de algunos vertebrados, son construidos de diversos materiales con efectos variables en aislamiento, propiedades antimicrobianas, conspicuidad y atracción de pareja. Los entornos antropogénicos, consecuencia del aumento de la población humana, impactan en los ecosistemas nativos, llevando a muchas especies de aves a incorporar materiales de construcción de origen antropogénico en sus nidos. Sin embargo, tales comportamientos rara vez se reportan en aves pequeñas terrestres. Este artículo describe la observación de un Soterrey (*Troglodytes aedon*) en un entorno urbano ecuatoriano, transportando plástico transparente para la construcción de su nido en una farola. Además discutimos la interacción de factores que podrían explicar este comportamiento novedoso. Esta visión del comportamiento de construcción de nidos aviares en entornos urbanos destaca la necesidad de estudios adicionales para desentrañar mecanismos adaptativos en medio de cambios ambientales y crecimiento poblacional.

**Palabras clave:** Bolsa de plástico, Impacto humano, Nidos, Sotorrey, Urbanización

### Abstract

Nests, critical structures for vertebrate development, exhibit diverse materials with varying effects on insulation, antimicrobial properties, concealment, and mate attraction. Anthropogenic environments, a consequence of increasing human populations, impact native ecosystems, leading many bird species to incorporate anthropogenic nest materials. However, such behaviors are seldom reported in small land birds. This article presents a unique observation of a House Wren (*Troglodytes aedon*) in an Ecuadorian urban setting, carrying transparent plastic for nest-building in a streetlamp. We discuss the interplay of factors that might explain this novel behavior. This insight into avian nest-building behavior in urban environments underscores the need for further studies to unravel adaptive mechanisms amid environmental changes and population growth.

**Keywords:** Human impacts, Nest, Plastic bag, Urbanization, Wren



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Elisa Bonaccorso

Recibido /  
Received:  
30/11/2023

Aceptado /  
Accepted:  
29/12/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
13/05/2024

Nests are structures built by a variety of vertebrates and often control the conditions where offspring develop [1,2,3]. Nesting materials often vary but can cause differing effects based on the emerging properties of the material. Such effects can change the nest's insulation, antimicrobial and antiparasitic properties, concealment, and even the owner's capacity for attracting mates [4].

Due to increasing human populations, anthropogenic environments are continuously replacing native ecosystems [5]. This loss of natural environments has caused various biotic and abiotic effects on native ecosystems. Human behaviors frequently impact both the natural areas adjacent to human settlements and the organisms residing in these areas. Numerous bird species incorporate anthropogenic material into their nests due to growing availability of pollutants globally [6]. The prevalence and type of anthropogenic nest materials (ANMs) used vary depending on availability; however, they can also depend on the preference of species or other variables [7].

Plenty of research has been done on the use of ANMs by seabirds [8,9,10,11,12,13]. However, terrestrial birds may have a higher amount of ANMs incorporated in their nests [6]. Numerous terrestrial birds, particularly passerine birds, have been found to use ANMs [14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27]. These behaviors occur in a variety of families within the order Passeriformes; nevertheless, the inclusion of ANMs in wrens of the family Troglodytidae has seldom been reported [28,29]. Likewise, in Latin America, these types of ecological records are rarely published. Despite its high biodiversity, the field of ecology of this region amounts to merely 9% of worldwide publications [30].

*Troglodytes aedon* (Vieillot, 1809) is a passerine bird belonging to the family Troglodytidae. Widely distributed, this species inhabits a vast range throughout the Americas, from southern Canada to the southernmost point of Argentina [31,32]. It exhibits a preference for habitats such as inter-Andean valleys and often coexists with human populations in various ecosystems [33,34,35,36]. In these areas, it is uncertain how urban anthropogenic disturbance affects the House Wren's ecological behaviors, like singing, diet, predation, or nesting [37,38,39,40]. In this paper, we document the use of ANMs by a House Wren (*Troglodytes aedon*).

On November 26, 2023, at 11:11 am, we observed for ~20 min and photographed one individual House Wren at the lookout located at the entrance of Parque Los Algarrobos in Cumbayá, Pichincha Province, Ecuador (-0.206636, -78.420660, WGS84). This individual was observed carrying a piece of transparent plastic in its beak (see Fig 1). The plastic material appeared to be from an aged clear wrapper or plastic bag with an elongated shape. The House Wren was identified following the Fieldbook of the Birds of Ecuador [41], based on its striped, brown coloration and pale-brown venter as diagnostic features.

The House Wren was initially spotted on the branches of a castor bean plant (*Ricinus communis*), approximately 7 m from the outlook towards the metropolitan park (Fig. 1A). From there, it traversed from branch to branch into a chilca plant (*Baccharis latifolia*) (Fig. 1B) and subsequently flew towards a streetlamp on the deck structure of the viewpoint. Entering the lamp (Fig. 1C), it reemerged about 1 min later without the piece of plastic. The wren then vocalized for about 2 min (Fig. 1D), positioned itself on top of the lamp post, and continued vocalizing (see Fig. 1E); this behavior persisted for approximately 10 min.





**Figure 1.** **A:** House Wren holding a piece of plastic on a Castor Bean plant. **B:** House Wren holding the piece of plastic on a chilca plant. **C:** House Wren entering streetlamp-nest with the piece of plastic. **D:** House Wren emerging from the streetlamp without the piece of plastic and vocalizing. **E:** House Wren on top of the streetlamp post vocalizing.

The observation of a House Wren individual incorporating ANMs into its nest raises intriguing questions about the factors influencing the use of these nest materials by urban land birds. In temperate areas, House Wren nesting is well documented. These reports include the use of artificial structures in disturbed areas and the occasional use of ANMs. Reported elements used to build nests include hanging sacks, oil cans, animal skulls, wooden beams, etc. [36,41,42,43]. This variety of materials demonstrates the species' adaptability to withstand human changes and environments but does not imply clear preferences for any element.

Five hypotheses have been proposed to explain the use of ANMs for birds in urban areas. (1) The *Availability Hypothesis* argues that the most common materials in the environment are going to be incorporated into nests, and thus the reduction of native plants in nesting areas can lead to the increase of ANMs due to their functional resemblance to natural nesting material [27,44,45]. (2) The *Age Hypothesis* states that



in urban areas, where birds tend to reach older ages, experienced (older) birds may use more ANMs due to their known resemblance to native materials [44,45,46,47]. (3) The *New Location Hypothesis* posits that novel nesting sites, such as buildings or nest boxes, challenge birds to acquire new nesting materials such as ANMs [45,48,49,50]. (4) The *Adaptive Hypothesis* posits that alterations in nest building materials and behavior stem from their adaptive value, with novel materials chosen for intrinsic benefits like antimicrobial activity or versatility [51,52,53,54]. Additionally, within this hypothesis, sexual selection may contribute, as suggested by the (5) *Signaling Hypothesis*, which proposes that as an extended phenotype, birds utilize ANMs to indicate reproductive quality through nest building [55,56,57].

The observed behavior seems to align with various of these hypotheses. However, we lean toward the *Availability Hypothesis*, which suggests that the scarcity of native plants may drive House Wrens to incorporate ANMs. The transparent plastic used by the House Wren, resembling natural materials with its elongated shape, might serve as an alternative amidst diminishing native resources. Additionally, the use of a streetlamp as a nesting structure could support the *New Location Hypothesis*, indicating the House Wrens' adaptation to unconventional nesting sites. Another intriguing possibility is that the observed behavior aligns with the *Signaling Hypothesis*. The vocalization of the male House Wren during nest building suggests a potential attraction mechanism, intertwining nest construction and mate attraction. The interplay of various factors from these hypotheses adds complexity to our understanding of the observed behavior.

In conclusion, this observation provides insights into the complex interplay of factors influencing avian nest-building behaviors in urban environments. Further studies are warranted to explore the prevalence of ANMs in wren nests and to unravel the underlying mechanisms and adaptive significance of such behaviors. Understanding these dynamics is crucial for the effective conservation and management of urban bird populations in the face of ongoing environmental changes and human population growth.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We express our gratitude to everyone who participated in the “Gran Bioblitz del Sur” for their valuable assistance and participation in the event. Special thanks to the Laboratorio de Zoología Terrestre and the Museo de Zoología ZSFQ, within the Instituto de Biodiversidad Tropical IBOTROP, at Universidad San Francisco de Quito USFQ, for their support in organizing such events and fostering our curiosity, enabling us to share this valuable information. Additionally, we extend our appreciation to Elisa Bonaccorso and the anonymous reviewers for their valuable suggestions on this manuscript.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Mateo Dávila-Játiva, Roberto J. León-E., and Ariel Guerrero-Campoverde spotted the nest building event together and contributed to the writing of the manuscript. Mateo Dávila-Játiva took the pictures and prepared the figure.

## REFERENCES

- [1] Hansell, M. H. (2005). *Animal Architecture*. OUP Oxford.
- [2] Mainwaring, M. C., Reynolds, S. J. & Weidinger, K. (2015). The influence of predation on the location and design of nests. In D. C. Deeming & S. J. Reynolds (Eds.), *Nests, Eggs, and Incubation: New ideas about avian reproduction* (p.0). Oxford University Press. doi: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198718666.003.0005>
- [3] Medina, I., M. Perez, D., Silva, A. C. A., Cally, J., León, C., Maliet, O. & Quintero, I. (2022). Nest architecture is linked with ecological success in songbirds. *Ecology Letters*, 25(6), 1365–1375. doi: <https://doi.org/10.1111/ele.13998>
- [4] Madden, J. (2001). Sex, bowers and brains. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 268(1469), 833–838. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1425>
- [5] Western, D. (2001). Human-modified ecosystems and future evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(10), 5458–5465. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.101093598>
- [6] Jagiello, Z., Dylewski, Ł., Tobolka, M. & Aguirre, J. I. (2019). Life in a polluted world: A global review of anthropogenic materials in bird nests. *Environmental Pollution*, 251, 717–722. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.028>
- [7] Batisteli, A. F., Guilherme-Ferreira, R. & Sarmento, H. (2019). Abundance and prevalence of plastic twine in nests of Neotropical farmland birds. *The Wilson Journal of Ornithology*, 131(1), 201. doi: <https://doi.org/10.1676/18-24>
- [8] Grant, M. L., Lavers, J. L., Hutton, I. & Bond, A. L. (2021). Seabird breeding islands as sinks for marine plastic debris. *Environmental Pollution*, 276, 116734. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116734>
- [9] O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. (2017). Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution*, 231, 1291–1301. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>
- [10] O'Hanlon, N. J., Bond, A. L., Masden, E. A., Lavers, J. L. & James, N. A. (2021). Measuring nest incorporation of anthropogenic debris by seabirds: An opportunistic approach increases geographic scope and reduces costs. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112706. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112706>
- [11] Ryan, P. G. (2020). Using photographs to record plastic in seabird nests. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111262>
- [12] Tavares, D. C., Moura, J. F., Acevedo-Trejos, E., Crawford, R. J. M., Makhado, A., Lavers, J. L., Witteveen, M., Ryan, P. G. & Merico, A. (2020). Confidence intervals and sample size for estimating the prevalence of plastic debris in seabird nests. *Environmental Pollution*, 263, 114394. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114394>
- [13] Yorio, P., Suárez, N., Ibarra, C., Gonzalez, P., Canti, S., Kasinsky, T. & Marinao, C. (2022). Anthropogenic debris in Kelp Gull and other seabird nests in northern Patagonia, Argentina. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113404>
- [14] Antczak, M., Hromada, M., Czechowski, P., Tabor, J., Zabłocki, P., Grzybek, J. & Tryjanowski, P. (2010). A new material for old solutions—The case of plastic string used in Great Grey Shrike nests. *Acta Ethologica*, 13(2), 87–91. doi: <https://doi.org/10.1007/s10211-010-0077-2>
- [15] Azevedo-Santos, V. M., Giarrizzo, T. & Arcifa, M. S. (2022). Plastic use by a Brazilian freshwater bird species in its nesting activities. *Water Biology and Security*, 1(4), 100065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2022.100065>
- [16] Blettler, M. C. M., Gauna, L., Andréault, A., Abrial, E., Lorenzón, R. E., Espinola, L. A. & Wantzen, K. M. (2020). The use of anthropogenic debris as nesting material by the greater thornbird, an inland–wetland-associated bird of South America. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41647–41655. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10124-4>
- [17] Borgia, G. (1985). Bower quality, number of decorations and mating success of male satin bowerbirds (*Ptilonorhynchus violaceus*): An experimental analysis. *Animal Behaviour*, 33(1), 266–271. doi: [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(85\)80140-8](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(85)80140-8)
- [18] Briggs, K. B., Deeming, D. C. & Mainwaring, M. C. (2023). Plastic is a widely used and selectively chosen nesting material for pied flycatchers (*Ficedula hypoleuca*) in rural woodland habitats. *Science of The Total Environment*, 854, 158660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158660>

- [19] Broughton, R. K. & Parry, W. (2019). A Long-tailed Tit *Aegithalos caudatus* nest constructed from plastic fibres supports the theory of concealment by light reflectance. *Ringing & Migration*, 34(2), 120–123. doi: <https://doi.org/10.1080/03078698.2019.1830518>
- [20] Carbo-Ramirez, P., González-Arrieta, R. A. & Zuria, I. (2015). Breeding Biology of the Rufous-backed Robin (*Turdus rufopalliatu*s) in an Urban Area Outside its Original Distribution Range. *The Wilson Journal of Ornithology*, 127(3), 515–521. doi: <https://doi.org/10.1676/14-056.1>
- [21] Gosler, A. G. (1987). Pattern and process in the bill morphology of the Great Tit *Parus major*. *Ibis*, 129(s2), 451–476. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1987.tb08234.x>
- [22] Harvey, J. A., Chernicky, K., Simons, S. R., Verrett, T. B., Chaves, J. A. & Knutic, S. A. (2021). Urban living influences the nesting success of Darwin's finches in the Galápagos Islands. *Ecology and Evolution*, 11(10), 5038–5048. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.7360>
- [23] Igic, B., Cassey, P., Samaš, P., Grim, T. & Hauber, M. (2009). Cigarette butts form a perceptually cryptic component of Song Thrush (*Turdus philomelos*) nests. *Notornis*, 56, 134–138.
- [24] Järvinen, P. & Brommer, J. E. (2020). Lining the nest with more feathers increases offspring recruitment probability: Selection on an extended phenotype in the blue tit. *Ecology and Evolution*, 10(23), 13327–13333. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.6931>
- [25] Kucherenko, V. M. & Ivanovskaya, A. V. (2020). Variation in common blackbird (*Turdus merula*) nest characteristics in urban and suburban localities in Crimea. *Zoodyversity*, 54(2), 157–162. doi: <https://doi.org/10.15407/zoo2020.02.157>
- [26] Townsend, A. K. & Barker, C. M. (2014). Plastic and the Nest Entanglement of Urban and Agricultural Crows. *PLoS ONE*, 9(1), e88006. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088006>
- [27] Wang, Y., Chen, S., Blair, R. B., Jiang, P. & Ding, P. (2009). Nest composition adjustments by Chinese Bulbuls *Pycnonotus sinensis* in an urbanized landscape of Hangzhou (E China). *Acta Ornithologica*, 44(2), 185–192. doi: <https://doi.org/10.3161/000164509X482768>
- [28] Cristofoli, S. I. & Sander, M. (2007). Composição do ninho de corruíra: *Troglodytes musculus* Naumann, 1823 (Passeriformes: Troglodytidae). *Biodiversidade Pampeana*, 5(2). <https://revistaselctronicas.pucrs.br/ojs/index.php/biodiversidadepampeana/article/view/2628>
- [29] Rusnak, C. M. & Labisky, R. F. (2003). *Carolina Wren (Thryothorus ludovicianus)*.
- [30] Wojciechowski, J., Ceschin, F., Pereto, S. C. a. S., Ribas, L. G. S., Bezerra, L. a. V., Ditttrich, J., Siqueira, T., & Padiál, A. A. (2017). Latin American scientific contribution to ecology. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 89, 2663–2674. doi: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160535>
- [31] Levin, R. N., Correa, S. M., Freund, K. A. & Fuxjager, M. J. (2023). Latitudinal and elevational variation in the reproductive biology of house wrens, *Troglodytes aedon*. *Ecology and Evolution*, 13(9), e10476. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.10476>
- [32] Tubaro, P. L. (1990). Song description of the House Wren (*Troglodytes aedon*) in two populations of eastern Argentina, and some indirect evidences of imitative vocal learning. *El Hornero*, 013(02). [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/hornero/document/hornero\\_v013\\_n02\\_p111](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/hornero/document/hornero_v013_n02_p111)
- [33] Hilty, S. L. & Brown, W. L. (1986). *A Guide to the Birds of Colombia*. Princeton University Press.
- [34] Ridgely, R. S. & Greenfield, P. J. (2001). *The birds of Ecuador: Vol. Volume 1: Status, distribution and taxonomy*. New York: Comstock/Cornell Paperbacks, Cornell University Press
- [35] Freile, J. & Restall, R. (2018). *Birds of Ecuador*. London: Bloomsbury Publishing.
- [36] Rocha (2021). *Guía completa para conocer Aves del Uruguay* 2da ed. Edición de la banda Banda Oriental.
- [37] Muller, K. L., Stamps, J. A., Krishnan, V. V. & Willits, N. H. (1997). The effects of conspecific attraction and habitat quality on habitat selection in territorial birds (*Troglodytes aedon*). *The American Naturalist*, 150(5), 650–661. doi: <https://doi.org/10.1086/286087>
- [38] Heppner, J. J. & Ouyang, J. Q. (2021). Incubation behavior differences in urban and rural house wrens, *Troglodytes aedon*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 590069. doi: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.590069>
- [39] Sementili-Cardoso, G. & Donatelli, R. J. (2021). Anthropogenic noise and atmospheric absorption of sound induce amplitude shifts in the songs of Southern House Wren (*Troglodytes aedon musculus*). *Urban Ecosystems*, 24(5), 1001–1009. doi: <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01092-9>



- [40] vonHoldt, B. M., Kartzinell, R. Y., van Oers, K., Verhoeven, K. J. & Ouyang, J. (2021). Reorganization of molecular networks associated with DNA methylation and changes in the rearing environments of the house wren (*Troglodytes aedon*). *bioRxiv*, 2021-05. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.05.04.442647>
- [41] McMullan, M. & Navarrete, L. (2017). *Fieldbook of the birds of Ecuador, including the Galapagos islands and common mammals*. Second edition. Quito: Ratty Ediciones.
- [42] Atienzar, F., Belda, E. & Greño, J. (2010). Comparación de materiales utilizados en la construcción del nido y de los parámetros reproductores en el chochín *Troglodytes troglodytes* en la Font Roja y en la Sierra de Mariola. *Iberis* 8: 17–22.
- [43] Honorato, M. T., Altamirano, T. A., Ibarra, J. T., De la Maza, M., Bonacic, C. & Martin, K. (2016). Composición y preferencia de materiales en nidos de vertebrados nidificadores de cavidades en el bosque templado andino de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 37(3), 485–492.
- [44] Jagiello, Z. A., Dylewski, Ł., Winiarska, D., Zolnierowicz, K. M. & Tobolka, M. (2018). Factors determining the occurrence of anthropogenic materials in nests of the white stork *Ciconia ciconia*. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14726–14733. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1626-x>
- [45] Reynolds, S. J., Ibáñez-Álamo, J. D., Sumasgutner, P. & Mainwaring, M. C. (2019). Urbanisation and nest building in birds: A review of threats and opportunities. *Journal of Ornithology*, 160(3), 841–860. doi: <https://doi.org/10.1007/s10336-019-01657-8>
- [46] Evans, K. L., Newson, S. E. & Gaston, K. J. (2009). Habitat influences on urban avian assemblages. *Ibis*, 151(1), 19–39. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2008.00898.x>
- [47] Ibáñez-Álamo, J. D., Pineda-Pampliega, J., Thomson, R. L., Aguirre, J. I., Díez-Fernández, A., Faivre, B., Figuerola, J. & Verhulst, S. (2018). Urban blackbirds have shorter telomeres. *Biology Letters*, 14(3), 20180083. doi: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0083>
- [48] Reynolds, S. J., Davies, C. S., Elwell, E., Tasker, P. J., Williams, A., Sadler, J. P. & Hunt, D. (2016). Does the Urban Gradient Influence the Composition and Ectoparasite Load of Nests of an Urban Bird Species? *Avian Biology Research*, 9(4), 224–234. doi: <https://doi.org/10.3184/175815516X14725499175665>
- [49] Wang, Y., Chen, S., Jiang, P. & Ding, P. (2008). Black-billed Magpies (*Pica pica*) adjust nest characteristics to adapt to urbanization in Hangzhou, China. *Canadian Journal of Zoology*, 86(7), 676–684. doi: <https://doi.org/10.1139/Z08-045>
- [50] Wang, Y., Huang, Q., Lan, S., Zhang, Q. & Chen, S. (2015). Common blackbirds *Turdus merula* use anthropogenic structures as nesting sites in an urbanized landscape. *Current Zoology*, 61(3), 435–443. doi: <https://doi.org/10.1093/czoolo/61.3.435>
- [51] Clayton, D. H. & Wolfe, N. D. (1993). The adaptive significance of self-medication. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(2), 60–63. doi: [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90160-Q](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90160-Q)
- [52] Suárez-Rodríguez, M., López-Rull, I. & Macías García, C. (2013). Incorporation of cigarette butts into nests reduces nest ectoparasite load in urban birds: New ingredients for an old recipe? *Biology Letters*, 9(1), 20120931. doi: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0931>
- [53] Suárez-Rodríguez, M. & Macías García, C. (2014). There is no such a thing as a free cigarette; lining nests with discarded butts brings short-term benefits, but causes toxic damage. *Journal of Evolutionary Biology*, 27(12), 2719–2726. doi: <https://doi.org/10.1111/jeb.12531>
- [54] Suárez-Rodríguez, M. & García, C. M. (2017). An experimental demonstration that house finches add cigarette butts in response to ectoparasites. *Journal of Avian Biology*, 48(10), 1316–1321. doi: <https://doi.org/10.1111/jav.01324>
- [55] Jagiello, Z., Corsini, M., Dylewski, Ł., Ibáñez-Álamo, J. D. & Szulkin, M. (2022). The extended avian urban phenotype: Anthropogenic solid waste pollution, nest design, and fitness. *Science of The Total Environment*, 838, 156034. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156034>
- [56] Jagiello, Z., Reynolds, S. J., Nagy, J., Mainwaring, M. C. & Ibáñez-Álamo, J. D. (2023). Why do some bird species incorporate more anthropogenic materials into their nests than others? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1884), 20220156. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0156>
- [57] Schaedelin, F. C. & Taborsky, M. (2009). Extended phenotypes as signals. *Biological Reviews*, 84(2), 293–313. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00075.x>

## Evaluación de métodos estadísticos y matemáticos para estimar datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita, Pichincha, Ecuador

Santiago Bonilla-Cáceres<sup>1\*</sup>, Teresa Alejandra Palacios Cabrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Carrera de Ingeniería Ambiental, Quito, Ecuador.

\*Corresponding author's name, email: [osbonilla@uce.edu.ec](mailto:osbonilla@uce.edu.ec)

## Evaluation of statistical and mathematical methods to estimate missing pluviometric data in the microbasin of the Pita river, Pichincha, Ecuador

### Abstract

The absence of time series data on meteorological variables is a drawback in environmental sciences, especially with regard to precipitation, which is a key variable in several fields. Now, the present study aimed to compare several statistical and mathematical methods to generate missing pluviometric data in the microbasin of the Pita River, such as the Paulhus and Kohler method, multiple linear regression (MLR), Wavelet transform and artificial neural networks, using information from the hydrometeorological network of the Fund for Water Protection (FONAG) of Quito. The artificial neural networks were highly effective in generating pluviometric data in the study area, with coefficients of determination ( $R^2$ ) higher than 0.64; and root mean squared error (RMSE) lower than 3.4. In addition, multiple linear regression showed good correlations between real data and generated data; however, the insufficient linearity between independent variables makes it lose statistical reliability. In contrast, the Paulhus and Kohler method, together with the Wavelet transform, proved to be less effective, showing poor correlation and high errors in the simulated data. These findings underscore the importance of carefully choosing methods for estimating rainfall data in paramo areas to ensure the accuracy and reliability of results in water resources management.

**Keywords:** precipitation, meteorology, mathematical modeling, statistics, water resource

### Resumen

La ausencia de datos en series temporales de variables meteorológicas es un inconveniente en las ciencias ambientales, especialmente en lo que respecta a la precipitación, que es una variable clave en varios campos. Ahora bien, el presente estudio se propuso comparar varios métodos estadísticos y matemáticos para generar datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita, tales como el método de Paulhus y Kohler, la regresión lineal múltiple (RLM), la transformada de *Wavelet* y las redes neuronales artificiales; utilizando información de la red hidrometeorológica del Fondo para la Protección del Agua (FONAG) de Quito. Las redes neuronales artificiales fueron altamente efectivas para generar datos pluviométricos en la zona de estudio,



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:

Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:

27/02/2024

Aceptado /  
Accepted:

11/04/2024

Publicado en línea /  
Published online:

13/05/2024





con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.64; y raíces del error cuadrático medio menores (RMSE) a 3.4. Además, la regresión lineal múltiple presentó buenas correlaciones entre los datos reales y los datos generados. Sin embargo, la insuficiente linealidad entre variables independientes hace que se pierda confiabilidad estadística. En contraste, el método de Paulhus y Kohler, junto con la transformada de *Wavelet*, demostraron ser menos eficaces, mostrando una correlación deficiente y altos errores en los datos simulados. Estos hallazgos subrayan la importancia de elegir cuidadosamente los métodos de estimación de datos pluviométricos en zonas de páramo para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados en la gestión de recursos hídricos.

**Palabras clave:** precipitación, meteorología, modelo matemático, estadística, recurso hídrico

---

## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos climáticos influyen en la producción y suministro de recursos para la población, por lo tanto, cada país tiene la responsabilidad de supervisar las condiciones climáticas y sus cambios para realizar predicciones a corto, mediano y largo plazo [1]. Por tal razón, la ausencia de datos en series temporales de distintas variables meteorológicas (temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, etc.) es un inconveniente en las ciencias ambientales [2]. Cabe mencionar que algunos procedimientos de análisis pueden adaptarse a esta situación, pero otros requieren series completas [3]. Problemas comunes asociados con la falta de datos incluyen: la operación de estaciones meteorológicas de forma manual, la recopilación de información en momentos inoportunos, el mal funcionamiento de sensores automáticos y situaciones externas como interrupciones en el suministro eléctrico [4]. Además, la presencia de valores atípicos (*outliers*) puede considerarse como carencia de información en algunos estudios ambientales, dado que se descartan al ser tomados como errores instrumentales de los equipos de medición; caso contrario, tienen el potencial de afectar negativamente los resultados de un modelo numérico [5]. No obstante, es importante mencionar que, aunque estos tienen características diferentes al resto de información, numerosos estudios los incluyen dado que su eliminación podría resultar en la pérdida de información valiosa del fenómeno investigado [6].

Dentro de este marco, la precipitación es crucial, tanto en investigaciones hidrogeológicas, considerando que constituye el insumo principal para calcular balances hídricos y emitir alertas tempranas sobre posibles riesgos de sequía [7], como para la agricultura, en estudios de disponibilidad de lluvia para el diseño de mecanismos de recolección para lugares donde el acceso al agua es limitado [8]. Asimismo, es fundamental en el análisis de eventos extremos dentro del contexto del cambio climático [9]. Esta variable desencadena el ciclo hidrológico en la etapa terrestre, presentándose de manera aleatoria en relación al tiempo y espacio [10]. Por consiguiente, el análisis de eventos meteorológicos para la elaboración de modelos hidrológicos o la planificación de proyectos hidráulicos requieren principalmente de datos pluviométricos de alta calidad [11].

Ahora bien, cerca del 85 % del abastecimiento de agua para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) tiene su origen en los páramos [12] y, una de las zonas más importantes,



es la microcuenca del río Pita, reconocida como una de las fuentes hídricas clave para la ciudad; su río se integra a la cuenca alta del río Guayllabamba, que a su vez está incluida en la cuenca del río Esmeraldas [13]. El río Pita es responsable del 38 % de agua potable para el sur y centro de Quito, aportando un caudal de 1.6 m<sup>3</sup>/s a través del Sistema Pita-Puengasí. Es el segundo sistema más relevante en la distribución de agua potable para el DMQ después del sistema Papallacta [14]. En consecuencia, resulta necesario establecer estrategias que aborden la carencia de información en sistemas hidrológicos, con el fin de estudiar la disponibilidad del recurso hídrico.

Se emplean distintos enfoques para estimar datos faltantes en series temporales. Entre los más comunes de estas metodologías, se encuentran: la regresión lineal, la razón normal, la regresión múltiple y los modelos geoestadísticos; sin embargo, según Melo et al. [15], estos últimos requieren trabajar sobre semivariogramas, lo que puede llegar a aumentar de manera significativa su complejidad. También se utiliza la aplicación de redes neuronales para analizar los datos meteorológicos [16], y la transformada de *Wavelet*, la cual se ha popularizado en las últimas décadas como una herramienta de análisis espectral para bases de datos ambientales [17]. En la actualidad, la estimación mediante técnicas estadísticas y matemáticas se lleva a cabo utilizando sistemas informáticos, lo que facilita el manejo eficiente de grandes conjuntos de datos en un tiempo reducido y con una menor carga de trabajo humano [18].

El objetivo del presente estudio es comparar varios métodos estadísticos y matemáticos para generar datos pluviométricos faltantes en la microcuenca del río Pita, tales como el método de Paulhus y Kohler, la regresión lineal múltiple (RLM), la transformada de *Wavelet* y las redes neuronales artificiales, que son los más utilizados en las ciencias ambientales y de la tierra, mediante el empleo del *software* estadístico RStudio. Para su ejecución, se utilizó información de las estaciones de la red hidrometeorológica del Fondo para la Protección del Agua (FONAG), con el propósito de identificar la metodología más adecuada para posteriores investigaciones en regiones de páramo con características climáticas similares. En la Tabla 1 se presentan algunos trabajos previos que abordan metodologías similares a las propuestas en este estudio. Esta pequeña recopilación destaca la relevancia y el interés de las metodologías planteadas, subrayando la necesidad de un análisis y el estudio de su aplicabilidad en contextos nacionales.



**Tabla 1.** Trabajos previos relacionados con las metodologías aplicadas en la presente investigación

Metodología aplicada	Referencia
Paulhus y Kohler	[19]
	[20]
	[21]
	[22]
	[23]
Regresión Lineal Múltiple (RLM)	[24]
	[25]
	[26]
	[27]
	[28]
Transformada de <i>Wavelet</i>	[29]
	[30]
	[31]
	[32]
	[33]
Redes Neuronales Artificiales	[34]
	[35]
	[36]
	[37]
	[38]

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

La microcuenca del río Pita está políticamente en tres cantones: el DMQ, Mejía y Rumiñahui, abarcando mayoritariamente las parroquias de Píntag y Machachi [39]. La distribución parroquial del territorio dentro de la microcuenca se detalla de la siguiente manera: Píntag abarca el 55.8 %, Machachi un 38.2 %, Rumipamba un 3.2 % y Sangolquí el 1.7 % [40]. Los páramos de la vertiente occidental del volcán Sincholagua complementados por una fracción de los deshielos del volcán Cotopaxi, constituyen las principales fuentes de flujo para el río Pita [41]. La Figura 1 presenta el estado de los páramos en la zona alta de la microcuenca, en donde se encuentran los humedales de páramo que actúan como las principales fuentes de agua de calidad para la capital.

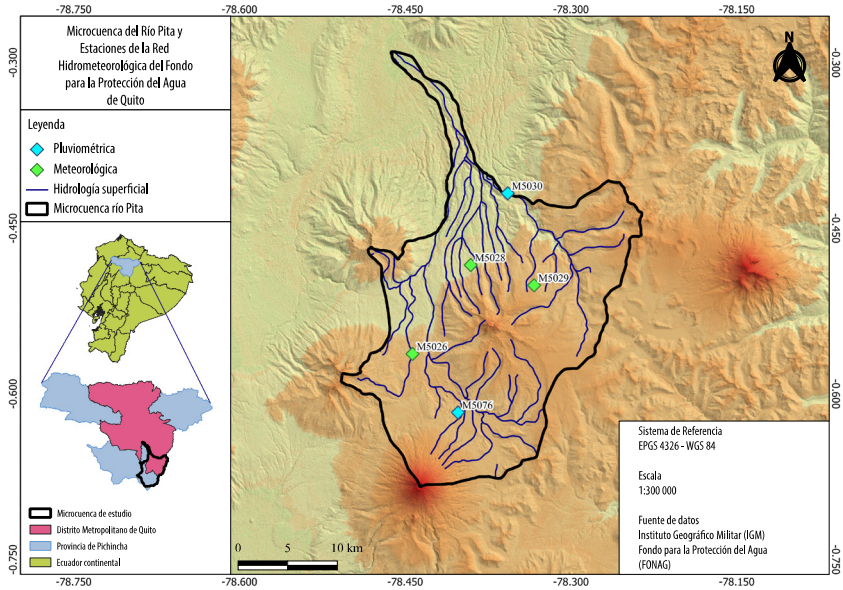


**Figura 1.** Páramos de la zona alta de la microcuenca del río Pita

La Tabla 2 ofrece un desglose de las coordenadas de las estaciones utilizadas en la investigación, incluyendo tanto las estaciones meteorológicas como las pluviométricas. Asimismo, la Figura 2 ilustra la ubicación específica de estas estaciones en la microcuenca de estudio.

**Tabla 2.** Estaciones Red Hidrometeorológica FONAG (Sistema de Referencia EPGS: 4326 – WGS 84)

Código	Tipo	Nombre	Longitud	Latitud	Altura (msnm)
M5028	Meteorológica	Hcda. Prado Miranda	-78.39071414	-0.48330906	3 526
M5029	Meteorológica	El Carmen	-78.33336768	-0.50165975	4 100
M5026	Meteorológica	Cotopaxi Control Norte	-78.44334571	-0.56382380	3 670
M5076	Pluviométrica	Potrerillos	-78.40224661	-0.61684014	3 866
M5030	Pluviométrica	Hcda. Gordillo	-78.35721535	-0.41833358	3 248



**Figura 2.** Mapa de microcuenca del río Pita y estaciones de la red hidrometeorológica de FONAG

### Fuente y tratamiento de datos

Los registros pluviométricos fueron adquiridos de la red hidrometeorológica del Fondo para la Protección del Agua (FONAG) de Quito, que son de acceso libre en su página web: [www.sedc.fonag.org.ec](http://www.sedc.fonag.org.ec). Estos datos comprenden las precipitaciones mensuales acumuladas de cinco estaciones situadas dentro de la microcuenca. Se empleó como criterio de selección de estaciones a aquellas que proporcionaran la información más completa posible. Por ello, se determinó analizar el periodo entre 2014 y 2023 (10 años), durante el cual la ausencia de datos de cada estación no excedió el 5 % (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Porcentaje de datos ausentes en información pluviométrica

Código	Tipo	Nombre	Datos disponibles	% Datos faltantes
M5028	Meteorológica	Hcda. Prado Miranda	116	3.33
M5029	Meteorológica	El Carmen	114	5.00
M5026	Meteorológica	Cotopaxi Control Norte	120	0.00
M5076	Pluviométrica	Potrerillos	119	0.83
M5030	Pluviométrica	Hcda. Gordillo	119	0.83

Se optó por completar los pocos datos faltantes utilizando la mediana de cada serie temporal, debido a que los diferentes conjuntos de datos presentaban una alta dispersión en términos de desviación estándar y varianza; esto se evidencia en los diagramas de caja y bigotes (Figura 3). Según Das e Imon [42], para conjuntos de datos con una alta dispersión, la mediana es menos susceptible a verse afectada por *outliers* o por alta variabilidad. Luego, para simular la generación de datos pluviométricos, se procedió a eliminar aleatoriamente el 20 % de los datos. En el estudio de Maharana et al. [43] se menciona que, al trabajar con bases de datos que sobrepasen el 20 % de información ausente, los modelos elaborados pierden robustez. De este modo, se permitió llevar a cabo la posterior comparación de los métodos establecidos sin comprometer la confiabilidad de los resultados.

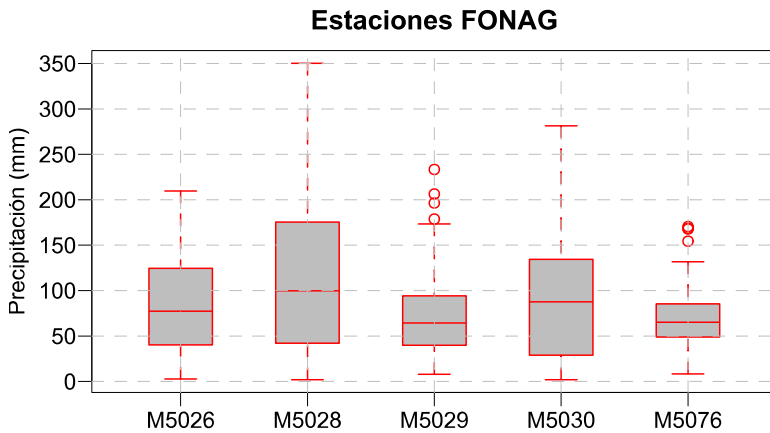


Figura 3. Boxplots de estaciones con información pluviométrica

En la Figura 4 se presenta un diagrama de flujo que esquematiza de manera general la metodología empleada en esta investigación. Este diagrama proporciona una visión panorámica de los pasos seguidos durante el desarrollo del estudio, desde la recolección y tratamiento de datos, hasta la ejecución, evaluación y análisis de los modelos estadísticos y matemáticos.

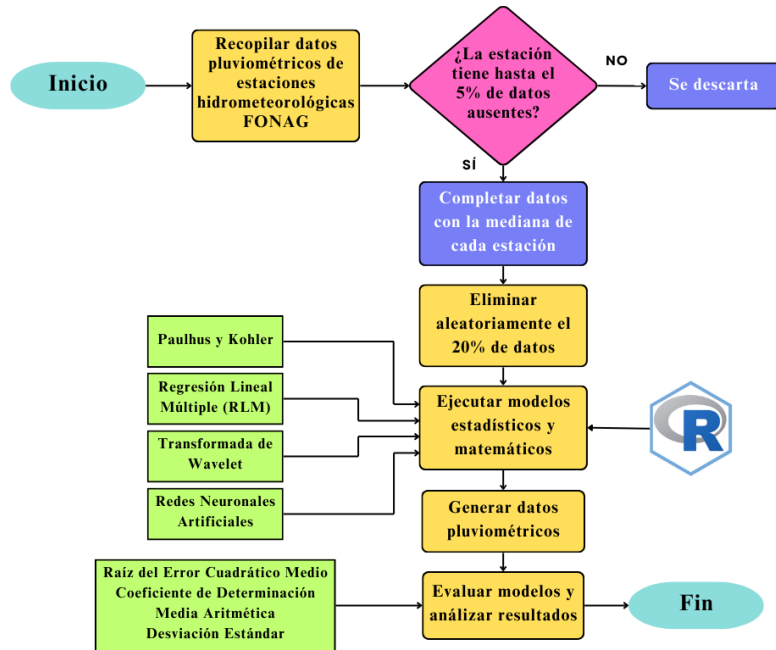


Figura 4. Proceso global de investigación

## Método de Paulhus y Kohler (1952)

También llamado método de razón normal, implica estimar el valor incompleto:  $x(t)$  de una serie, utilizando los datos de estaciones cercanas y simultáneas que muestren una fuerte correlación con la serie a completar [44]. Esto se realiza mediante la Ecuación 1.

$$x(t) = \frac{1}{3} \left[ \frac{\bar{x}}{\bar{x}_1} x_1(t) + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_2} x_2(t) + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_3} x_3(t) \right] \quad (1)$$

Donde:

$\bar{x}$ : media aritmética de datos pluviométricos

$\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ : media aritmética de estaciones vecinas

$x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ : datos pluviométricos de series vecinas

Para su ejecución se utilizó el paquete *climatol* del software estadístico RStudio donde, además de la opción de normalizar los datos dividiéndolos por sus valores medios, *climatol* también brinda la posibilidad de realizar esta normalización restando las medias o llevando a cabo una estandarización completa. Por lo tanto, tras denominar  $m_x$  y  $s_x$  a la media y desviación estándar de una serie  $X$ , a continuación se muestran las alternativas disponibles para la normalización de datos pluviométricos [45]:



- Restar la media:  $x = X - m_x$
- Dividir por la media:  $x = X/m_x$
- Estandarizar:  $x = (X - m_x)/s_x$

El principal desafío de este método radica en el desconocimiento de los valores de medias aritméticas y de desviaciones estándar de las series durante el periodo de estudio, lo que es común en las bases de datos reales. Por lo tanto, *climatol* aborda este problema al calcular inicialmente estos parámetros con los datos disponibles en cada serie. Luego, rellena los datos faltantes utilizando estas medias y desviaciones estándar provisionales, y vuelve a calcularlos con las series rellenas. Posteriormente, se recalculan los datos inicialmente faltantes utilizando los nuevos parámetros, lo que resulta en nuevas medias y desviaciones estándar. Este proceso se repite hasta que ninguna media cambie al redondearla con la precisión inicial de los datos [45]. Una vez que las medias han sido estabilizadas, se lleva a cabo la normalización de todos los datos, seguida de la estimación de los mismos, tanto en las series existentes como en las que no están completas, utilizando la Ecuación 2.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j} \quad (2)$$

Donde  $\hat{y}$  representa el valor estimado utilizando los  $n$  datos  $x_j$ , más cercanos disponibles en cada intervalo de tiempo, y  $w_j$  es el peso asignado a cada uno de ellos.

### Regresión Lineal Múltiple (RLM)

Hay una variedad de técnicas de regresión que varían dependiendo del tipo de variables y de la relación funcional supuesta entre ellas. Las técnicas más básicas, aunque muy efectivas en términos de la cantidad de información que pueden proporcionar, son las regresiones lineales [46]. La regresión lineal múltiple se construye a partir de una regresión lineal simple, la cual se utiliza cuando se tiene más de una variable independiente [47]. En este estudio, el modelo de regresión se aplica para datos pluviométricos y se adapta a las condiciones y necesidades del análisis, tal como se ilustra en la Ecuación 3.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k + \epsilon \quad (3)$$

Donde:

$y$ : valor de precipitación que se quiere estimar

$x_1, x_2, \dots, x_k$ : datos pluviométricos de estaciones hidrometeorológicas vecinas

$b_0$ : intercepto o valor de precipitación cuando todas las estaciones tienen valores de 0

$b_1, b_2, \dots, b_k$ : coeficientes de regresión

$\epsilon$ : errores aleatorios

Cuando se tienen  $n$  observaciones o filas en el conjunto de datos pluviométricos, se obtiene el siguiente modelo:



$$\begin{aligned}
 y_1 &= b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{12} + \dots + b_kx_{1k} + \epsilon_1 \\
 y_2 &= b_0 + b_1x_{21} + b_2x_{22} + \dots + b_kx_{2k} + \epsilon_2 \\
 y_3 &= b_0 + b_1x_{31} + b_2x_{32} + \dots + b_kx_{3k} + \epsilon_3 \\
 &\dots \\
 y_n &= b_0 + b_1x_{n1} + b_2x_{n2} + \dots + b_kx_{nk} + \epsilon_n
 \end{aligned}$$

Utilizando matrices, se puede representar el sistema de  $n$  ecuaciones mediante la Ecuación 4.

$$y = Xb + \epsilon \tag{4}$$

Donde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

En general,  $y$  es un vector ( $n \times 1$ ) de datos pluviométricos,  $X$  es una matriz ( $n \times p$ ) de los niveles de las variables independientes (información pluviométrica de estaciones hidrometeorológicas vecinas),  $b$  es un vector ( $p \times 1$ ) de los coeficientes de regresión y  $\epsilon$  es un vector ( $n \times 1$ ) de los errores aleatorios. De esta manera, los estimadores de mínimos cuadrados se calculan mediante la Ecuación 5.

$$L = \sum \epsilon_i^2 = \epsilon' \epsilon = (y - Xb)'(y - Xb) \tag{5}$$

El estimador de mínimos cuadrados  $\hat{b}$  es la solución para el vector  $b$  (Ecuación 6).

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 0 \tag{6}$$

Finalmente, al resolver la ecuación diferencial anterior se obtiene la Ecuación 7, donde se determinan los coeficientes de regresión para el modelo.

$$\hat{b} = (X'X)^{-1}X'y \tag{7}$$



En la regresión lineal múltiple, se utilizan múltiples variables explicativas, lo que posibilita el aprovechamiento de una mayor cantidad de información en la construcción del modelo y, por consiguiente, la obtención de estimaciones más precisas para completar las series pluviométricas.

### Transformada de *Wavelet*

El tercer método utilizado corresponde a las transformadas de *Wavelet*, que son herramientas matemáticas que permiten analizar señales de manera similar a la transformada de Fourier de tiempo corto, proporcionando información tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia [48]. Las transformadas de *Wavelet* permiten estudiar características en la serie espacial con un detalle ajustado a su escala, es decir, rasgos amplios a gran escala y rasgos finos a pequeña escala. Esta característica es útil para las variaciones espaciales que son significativamente no estacionarias y tienen componentes transitorios de corta duración [49]. De esta manera, el análisis *Wavelet* tiene distintas aplicaciones, desde la dinámica de fluidos [50], la geofísica [51] y la hidrología [52], como en esta investigación. Las *wavelets*, fundamentales en la transformada *wavelet* madre, representan una señal mediante versiones desplazadas y escaladas de una onda finita que pueden generarse a partir de un conjunto de datos experimentales. Esta transformada no solo es local en el dominio del tiempo, sino también en el dominio de la frecuencia [53]. Una vez que se tiene una *wavelet* madre, se pueden generar *wavelets* mediante las operaciones de dilatación y traslación [54]. Para números enteros  $j, k$  se utiliza la Ecuación 8.

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \tag{8}$$

Resulta que estas ondículas pueden formar un conjunto ortonormal (Ecuación 9).

$$\langle \psi_{j,k}, \psi_{j',k'} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,k}(x) \psi_{j',k'}(x) dx = \delta_{j,j'} \delta_{k,k'} \tag{9}$$

Donde  $\delta_{m,n} = 1$  si  $m = n$ , y  $\delta_{m,n} = 0$  si  $m \neq n$ . En este caso  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  es el producto interior. Además, ese conjunto de ondículas puede formar bases para varios espacios de funciones. Por ejemplo, y más técnicamente,  $\{\psi_{j,k}(x)\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$  puede ser una base ortonormal completa para  $L^2(\mathbb{R})$ . Así, dada la función  $f(x)$ , se procede a descomponerla en una serie de Fourier generalizada, como indica la Ecuación 10.

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(x) \tag{10}$$

Donde, debido a la ortogonalidad de las ondículas, se obtiene la Ecuación 11.

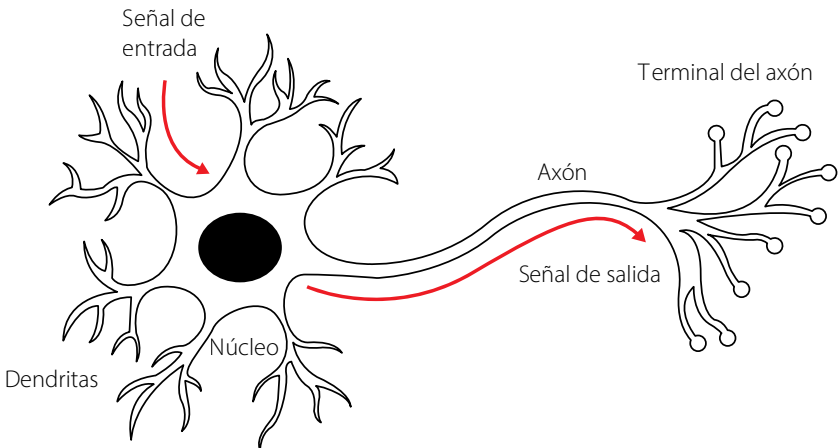
$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{j,k}(x) dx = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \tag{11}$$



Para enteros  $j, k$ , los números  $\{d_{j,k}\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$  se denominan coeficientes de *wavelet* de  $f$ , generando una función que se asemeja al conjunto de datos ingresados, que en esta investigación son las observaciones pluviométricas de cada estación hidrometeorológica. Para varias situaciones, las *wavelets* resultan útiles, aunque hay numerosos casos donde otros métodos disponibles son igualmente eficientes o incluso superiores. El paquete *WaveletComp* de RStudio permite trabajar esta metodología de una manera más rápida, y a su vez, ofrece opciones de trazado que facilitan un ajuste óptimo del modelo.

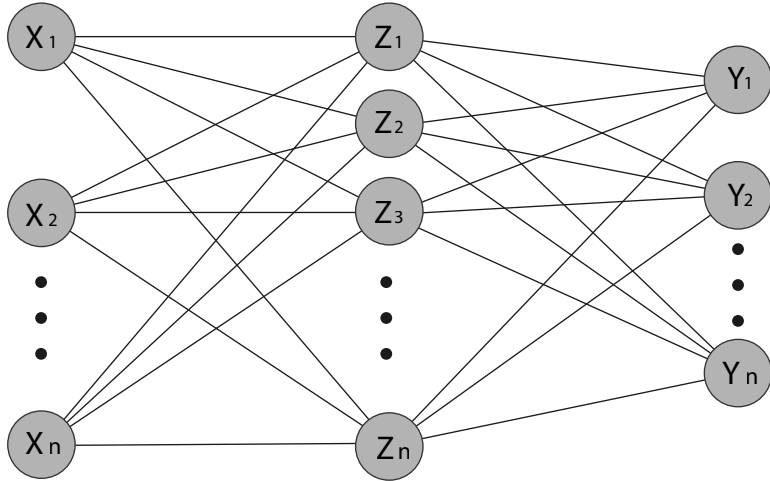
## Redes Neuronales Artificiales

Dado que las redes neuronales artificiales se diseñaron intencionalmente como modelos conceptuales de la actividad cerebral humana, resulta útil comprender primero cómo funcionan las neuronas biológicas. La Figura 5 ilustra como las señales entrantes son recibidas por las dendritas de la célula a través de un proceso bioquímico, y su vez, emitiendo una señal de salida por el axón [55].



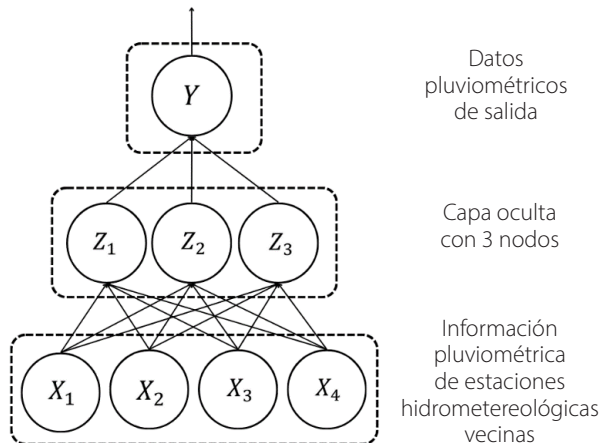
**Figura 5.** Representación artística de una neurona biológica. Imagen con base en [55]

Así, una red neuronal artificial es un modelo de regresión o clasificación en dos etapas, generalmente suele representarse mediante un diagrama de red, como lo muestra la Figura 6.



**Figura 6.** Esquema de una red neuronal con una capa oculta. Imagen con base en [56]

Para regresión, normalmente hay una sola unidad de salida  $Y_1$  en la parte superior, como es el caso de esta investigación (Figura 7), en donde las estaciones hidrometeorológicas vecinas se transforman en las dendritas de entrada, y la estación con datos faltantes es la variable de salida donde se generarán los nuevos datos pluviométricos. Sin embargo, es importante mencionar que estas redes pueden manejar múltiples respuestas cuantitativas de forma fluida [56].



**Figura 7.** Representación de una estructura de red neuronal artificial con una capa oculta de 3 nodos para estimación de datos pluviométricos

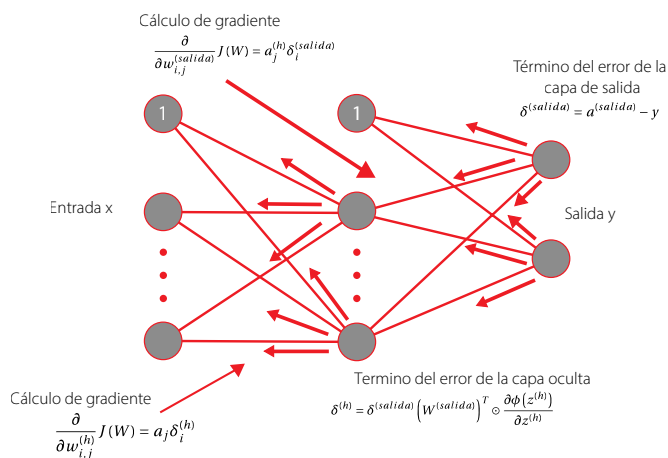


Una neurona artificial típica con  $n$  dendritas de entrada puede representarse mediante la Ecuación 12. Los pesos ( $w_i$ ) permiten que cada una de las  $n$  entradas de  $x$  contribuya en mayor o menor medida a la suma de las señales de entrada. El valor acumulado se pasa a la función de activación,  $f(x)$ , y la señal resultante,  $y(x)$ , es el axón de salida [57].

$$y(x) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \tag{12}$$

En el presente estudio se utilizó el algoritmo de retropropagación (*backpropagation*), que es el método de entrenamiento predominante en redes neuronales. Este método de aprendizaje supervisado emplea el descenso del gradiente, que se divide en dos fases: en primer lugar, se introduce un patrón de entrada que se propaga a través de las diferentes capas de la red neuronal hasta generar la señal de salida. Luego, esta salida se compara con la salida deseada para calcular el error en cada neurona y los errores se retropropagan desde la capa de salida hacia todas las neuronas de las capas intermedias [58]. Cada neurona recibe un error que refleja su influencia en el error global de la red. A partir de este error recibido, se realizan ajustes en los pesos sinápticos de cada neurona. El propósito consiste en reducir al mínimo el error entre la salida producida por la red y la salida deseada por el usuario cuando se presenta un conjunto de patrones  $p$ , conocido como conjunto de entrenamiento. Por consiguiente, el error se distribuye en sentido opuesto al flujo normal de información de la red. Así, el algoritmo identifica y corrige los errores durante el proceso de aprendizaje, comenzando desde las capas más profundas y retrocediendo hacia la entrada. Para simplificar este procedimiento, se empleó el paquete *neuralnet* de RStudio, el cual facilita la implementación de este método al especificar los parámetros de entrada, como el número de nodos en las capas ocultas, y definir variables dependientes e independientes.

La Figura 8 presenta un resumen del funcionamiento del algoritmo de *backpropagation* utilizado en la ejecución de redes neuronales artificiales.



**Figura 8.** Backpropagation en redes neuronales artificiales. Imagen con base en [59]



## Métricas de evaluación

Con el fin de determinar el método óptimo de generación de datos pluviométricos, se establecieron dos métricas principales: Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*) y Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ). La métrica RMSE es comúnmente empleada para evaluar la efectividad de un modelo de regresión. Su función es determinar la discrepancia entre dos conjuntos de datos, comparando las predicciones del modelo con los valores reales (Ecuación 13) [60].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (13)$$

Donde:

$y_j$ : serie pluviométrica original  
 $\hat{y}_j$ : serie pluviométrica estimada

Mientras que el coeficiente de determinación proporciona información sobre el grado de relación entre las dos variables que explican la fluctuación de los datos (Ecuación 14) [61]. Para el caso de estudio, las dos variables serán los datos estimados y los datos reales.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

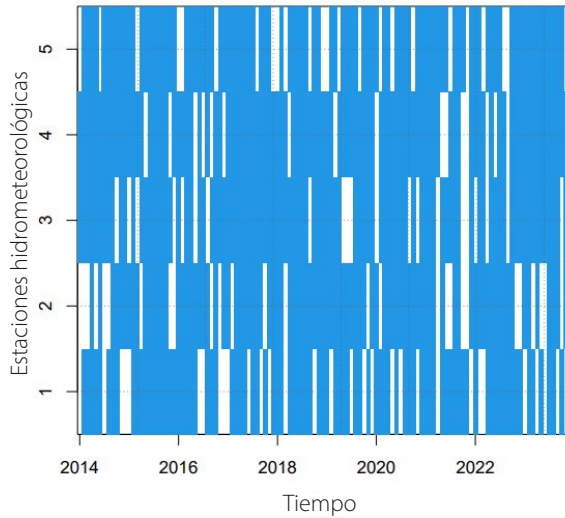
Donde:

$y_i$ : serie pluviométrica original  
 $\hat{y}_i$ : serie pluviométrica estimada  
 $\bar{y}$ : media de datos pluviométricos

No obstante, también se aplicó la media aritmética y la desviación estándar a los conjuntos de datos antes y después de la simulación.

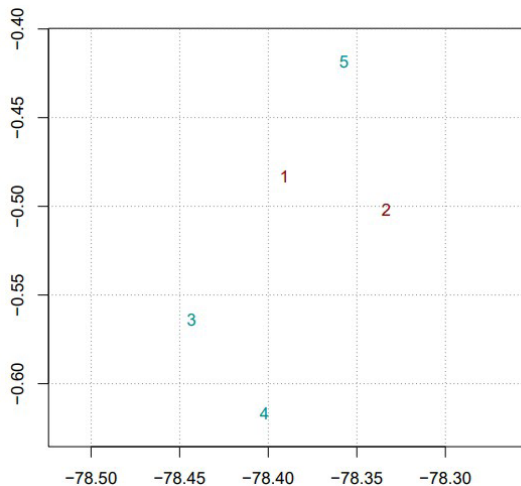
## RESULTADOS

Con *climatol* se pudo visualizar el conjunto de datos de las cinco estaciones, donde los espacios en blanco constituyen la información pluviométrica ausente que se eliminó de manera aleatoria para simular las metodologías presentadas anteriormente (Figura 9).



**Figura 9.** Disponibilidad de datos pluviométricos de estaciones hidrometeorológicas

La Figura 10 muestra la distribución espacial de las estaciones en la zona de estudio, en donde *climatol* realizó automáticamente un *clustering* jerárquico para identificar patrones. Se observaron dos clústeres distintos, representados en el gráfico por estaciones marcadas en verde y estaciones marcadas en rojo. Los clústeres identificados en el gráfico sugieren la presencia de dos áreas geográficas distintas, cada una con características climáticas únicas.



**Figura 10.** Agrupamiento de estaciones hidrometeorológicas mediante *climatol*



Los diagramas de anomalías (Figura 11) incluyen dos líneas suplementarias en la sección inferior, las cuales indican la mínima separación entre los datos adyacentes (en verde) y la cantidad de datos de referencia empleados (en naranja), ambas utilizando la escala logarítmica del eje derecho. El análisis de los diagramas de anomalías de precipitación acumulada mensual es esencial para examinar las desviaciones en los patrones de lluvia a lo largo del tiempo. Estos diagramas muestran claramente los periodos donde se han observado cambios significativos en la precipitación acumulada, destacando tanto los excesos como los déficits de lluvia respecto a las condiciones climáticas durante 10 años de estudio (2014-2023). En las cinco estaciones también se señalan con una línea vertical discontinua las posibles fechas de cambio tras la evaluación de la homogeneidad de la serie.

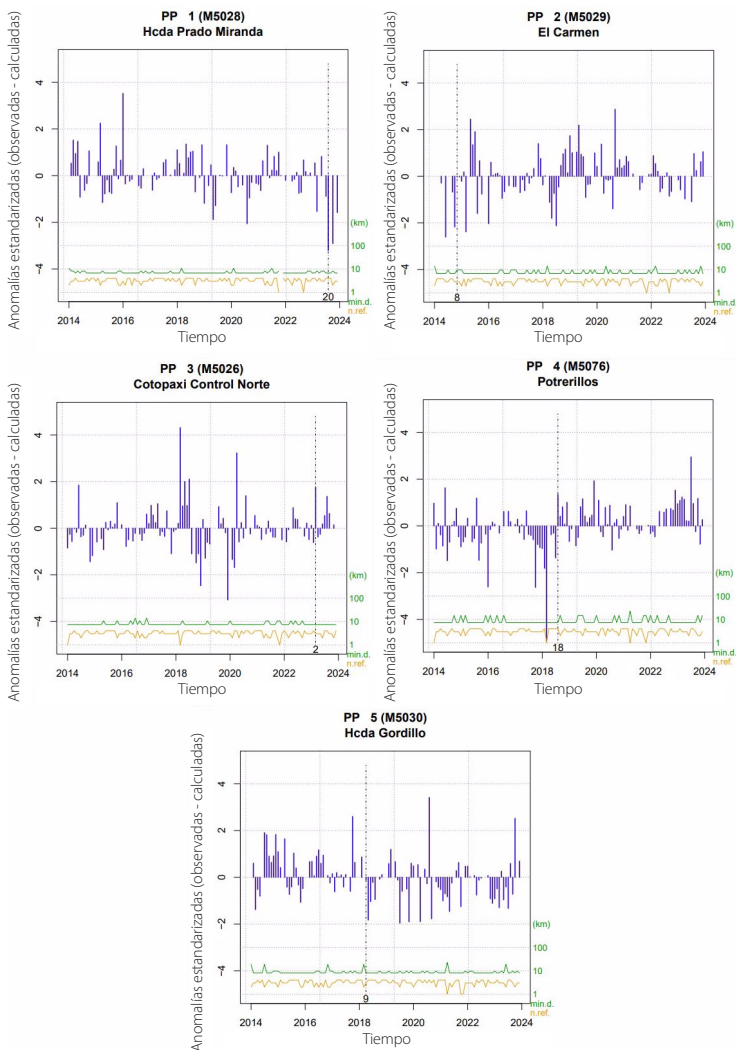


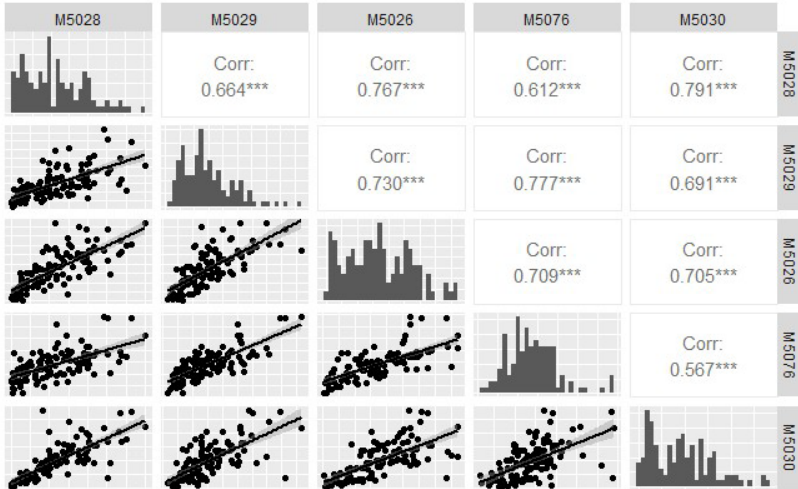
Figura 11. Anomalías climáticas en información pluviométrica



Una vez completadas las series temporales, se observaron diferencias significativas entre los valores originales y los datos generados, tal como se refleja en las métricas de evaluación (Tabla 5). El RMSE revela la magnitud promedio del error de predicción, evidenciando discrepancias considerables entre los valores observados y los generados, con RMSEs de 120.96, 69.83, 81.77, 81.04 y 69.54 para las estaciones M5028, M5029, M5026, M5076 y M5030, respectivamente. Ahora bien, los valores de  $R^2$  fueron extremadamente bajos, oscilando entre 0.000 y 0.067, lo que sugiere una variabilidad significativa no explicada por el modelo. Al comparar las medias aritméticas de los datos originales con los completados, se evidenció una variación diferencial entre estaciones, lo que sugiere una influencia heterogénea de la estimación en la tendencia central de las series temporales. Por otro lado, la comparación de las desviaciones estándar de los datos originales y completados mostró cambios más sutiles, lo que indica una relativa estabilidad en la dispersión de los datos después de la aplicación de los métodos de estimación.

Para la generación de datos a través de la regresión lineal múltiple (RLM), se generó un modelo específico para cada estación, empleando las estaciones restantes como variables independientes en el proceso. Ante todo, se analizó la relación estadística entre los datos pluviométricos de todos los conjuntos de datos. La consideración de esta información es fundamental para determinar los predictores óptimos del modelo, identificar variables con relaciones no lineales que no deben ser consideradas y detectar posibles problemas de multicolinealidad entre los predictores. Al mismo tiempo, se sugiere complementar este análisis representando la distribución de cada variable a través de histogramas (Figura 12), que demuestran una forma asimétrica, lo que sugiere que la variable de precipitación acumulada mensual no sigue una distribución normal.

Los histogramas muestran una distribución levemente sesgada hacia la derecha, indicando una mayor frecuencia de valores de precipitación menores que la media. Además, los datos recopilados de las diversas estaciones en la microcuenca del río Pita exhiben multicolinealidad, lo que indica que varias variables están linealmente relacionadas entre sí. Por último, los coeficientes de Pearson superan el 0.65 en todas las estaciones, excepto en M5030 con M5076, lo que impide la identificación clara del efecto individual de cada variable sobre la variable respuesta.



**Figura 12.** Matriz de correlación de datos pluviométricos

En la Tabla 4 se describen las ecuaciones generadas por regresión lineal múltiple para cada estación, cabe señalar que el valor *p-value* es estadísticamente significativo para cada modelo generado ( $2.2e-10$ ), lo que sugiere que los modelos no son aleatorios y al menos uno de los coeficientes de regresión parciales es diferente de cero.

**Tabla 4.** Ecuaciones de regresión para cada estación en la microcuenca del río Pita

Estación	Ecuación
M5028	$M5028 = 2.4790 + 0.6598 M5026 + 0.6124 M5030$
M5029	$M5029 = -4.7318 + 0.1605 M5026 + 0.6926 M5076 + 0.1924 M5030$
M5026	$M5026 = 2.5013 + 0.2916 M5028 + 0.2682 M5029 + 0.4076 M5076$
M5076	$M5076 = 24.4884 + 0.1834 M5026 + 0.3871 M5029$
M5030	$M5030 = 4.4462 + 0.4821 M5028 + 0.4418 M5029$

La validación de los métodos se llevó a cabo mediante el análisis de la linealidad entre las variables independientes y los residuos del modelo, un aspecto clave para determinar la homocedasticidad. Esta condición se verifica cuando los residuos muestran una distribución aleatoria alrededor de cero. Los valores de RMSE fluctúan entre 19.71 y 53.56, y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) varía entre 0.552 y 0.727 (Tabla 5). Estos resultados indican que los modelos explican más del 50 % de la variabilidad en los datos de precipitación. Además, se observa que la media aritmética se mantiene constante con la aplicación del modelo, mientras que la dispersión de datos disminuye, lo cual se refleja en una menor desviación estándar después de aplicar los modelos de regresión.

Por otro lado, la aplicación de la transformada de *Wavelet* posibilitó la reconstrucción de las diversas series de datos mediante el empleo de herramientas matemáticas de vanguardia. La





Figura 13 muestra la descomposición de *wavelet* de la serie temporal de datos pluviométricos recopilados durante el período de estudio utilizando la función *wt.image* de la librería *WaveletComp* en RStudio. Esta imagen resultante presenta una representación visual de la distribución de energía en diferentes escalas temporales, destacando patrones y estructuras de variabilidad multiescalar en los datos pluviométricos. El eje horizontal representa el tiempo (10 años), mientras que el eje vertical representa la escala o frecuencia. Además, se pueden identificar visualmente áreas de alta o baja variabilidad, coincidiendo con las mismas áreas de la Figura 11 de anomalías pluviométricas. A su vez, los cambios temporales en la estructura de descomposición proporcionan información crucial sobre la dinámica temporal de los datos pluviométricos. En esta representación, las áreas de color rojo intenso indican niveles más altos de periodicidad, mientras que las áreas delimitadas por líneas de contorno blancas representan componentes periódicos significativos en la serie temporal. Se observan patrones mensuales que reflejan el comportamiento de la precipitación en diferentes periodos de tiempo, como las temporadas de invierno en la región de la sierra, que generalmente abarcan los primeros meses del año, desde enero hasta mayo.

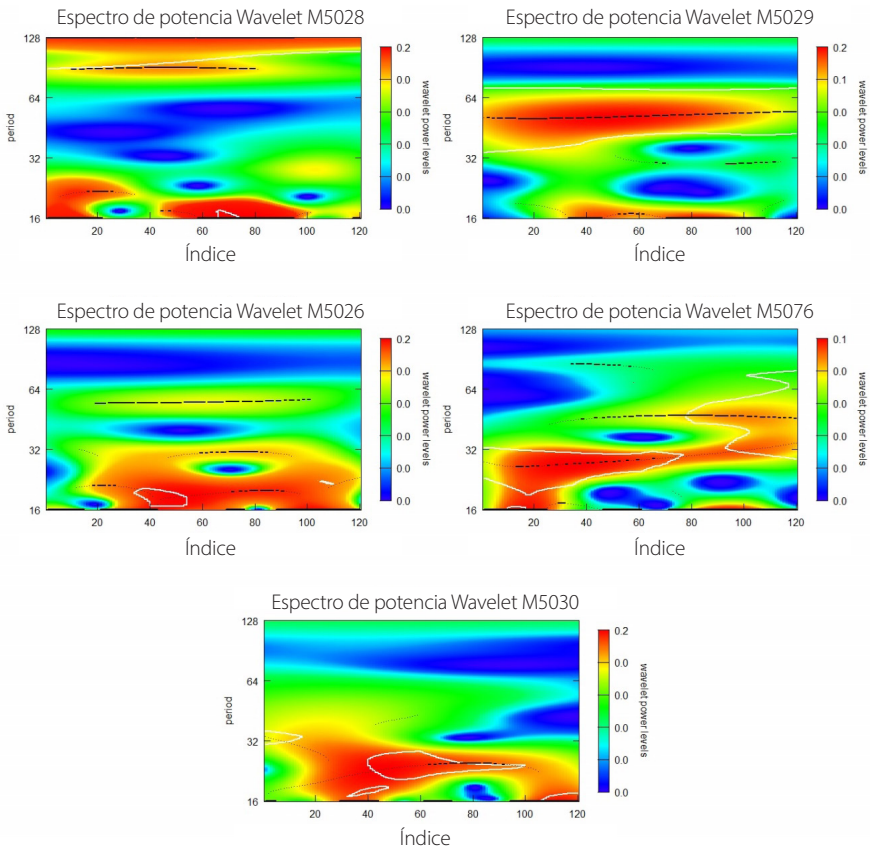


Figura 13. Espectrogramas *Wavelet*



La Figura 14 muestra la reconstrucción de la serie temporal de datos pluviométricos mediante la aplicación de la función *reconstruct*. Esta visualización representa la serie temporal reconstruida a partir de la descomposición de la *wavelet* previamente realizada. Los nuevos datos pluviométricos estimados se ilustran en color rojo, mientras que de color negro está la serie de datos originales. La reconstrucción resalta las tendencias temporales, donde al final del periodo de tiempo se identifica una tendencia a la baja en la mayoría de estaciones, indicando un cambio gradual en los patrones de lluvia en la microcuenca. Igualmente, los ciclos estacionales revelan fluctuaciones notables en la cantidad de precipitación durante diferentes periodos anuales, mientras que las variaciones multiescales presentes en los datos pluviométricos ofrecen la presencia de ciclos climáticos de diferente duración, como en el caso de eventos climáticos extremos, característicos en la región.

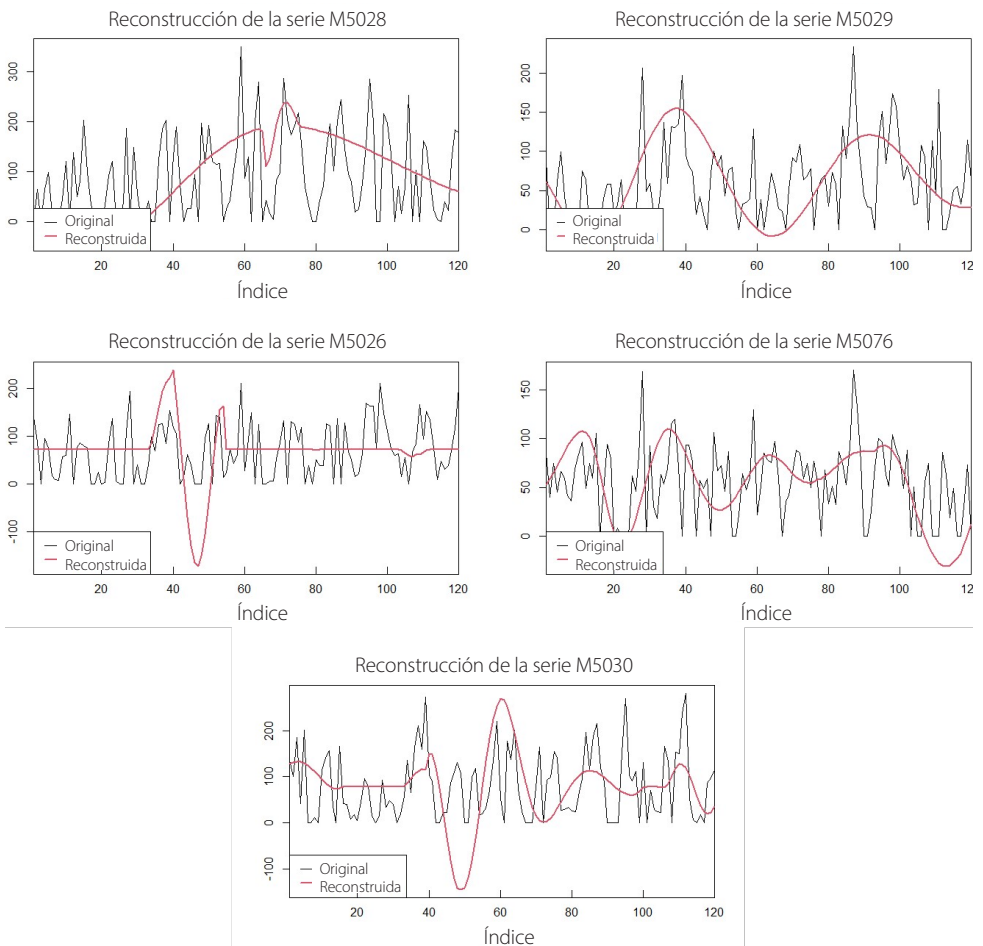


Figura 14. Reconstrucción de series temporales



Los resultados del método (Tabla 5) muestran una amplia variabilidad en los valores de RMSE, que oscilan entre 56.24 y 118.96. Además, los valores de  $R^2$  varían entre 0.012 y 0.253. Antes de la implementación de los métodos de rellenado, se evidencia una cierta inestabilidad en los datos originales, reflejada en una amplia gama de valores para la media aritmética y la desviación estándar, que van desde 67.30 hasta 113.05 y desde 44.22 hasta 81.04, respectivamente. Sin embargo, después de la aplicación de los modelos de transformada de *wavelet*, se observa una mejora en la estabilidad de los datos, con una reducción en la dispersión y una ligera ajuste en la media aritmética, que varía entre 61.48 y 101.93, y en la desviación estándar, que fluctúa entre 47.97 y 77.65.

Para la implementación del método de redes neuronales artificiales, se utilizó la librería *neuralnet*, la cual permitió configurar arquitecturas de red con dos capas ocultas para cada modelo asociado a las estaciones de estudio, compuestas por 5 y 3 nodos respectivamente. Después de probar varias configuraciones, se determinó que aumentar el número de nodos conlleva a mayores exigencias computacionales, mientras que reducir el número de nodos resulta en un incremento de errores. Para el entrenamiento de estos modelos, se asignó aleatoriamente el 70 % de los datos como conjunto de entrenamiento y el 30 % restante como conjunto de prueba. La visualización de los modelos generados por las redes neuronales para cada estación, junto con su correspondiente evaluación de errores y etapas de procesamiento, se presenta en la Figura 15.

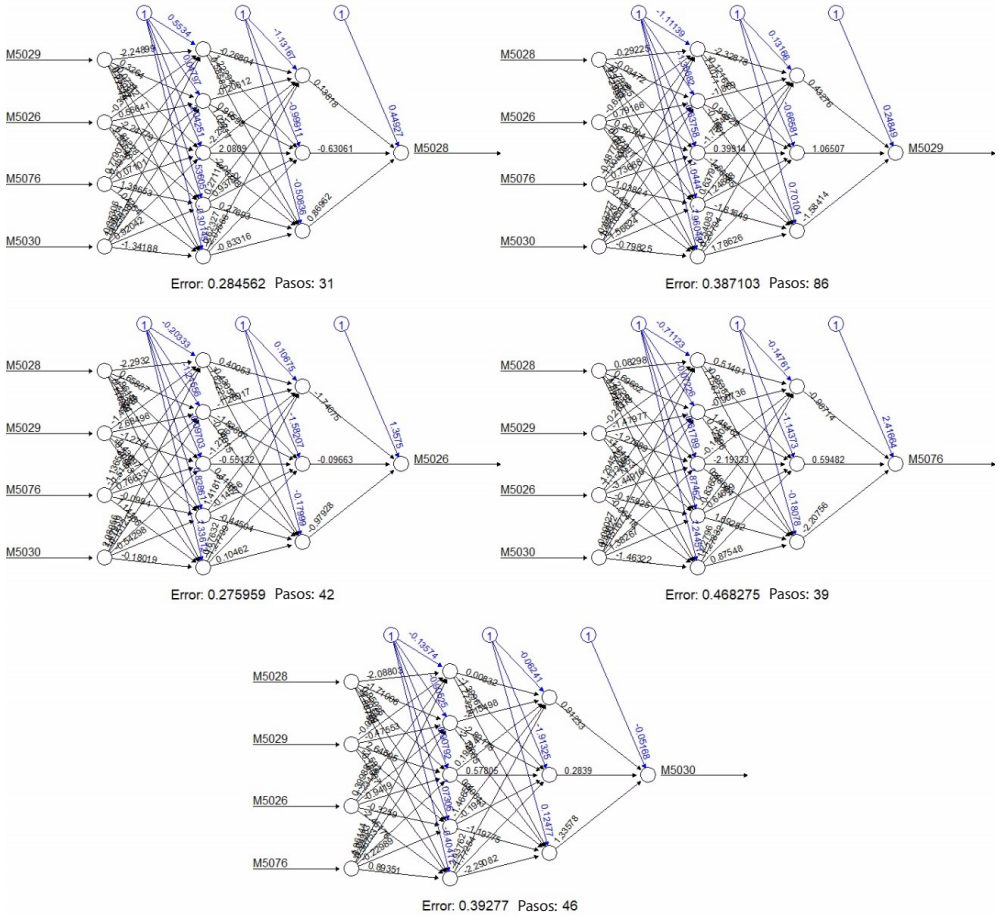


Figura 15. Redes neuronales artificiales por retropropagación

En los resultados del modelo de redes neuronales al rellenar datos pluviométricos, el error cuadrático medio (RMSE) muestra una variabilidad entre 1.56 y 3.41, lo que indica diferencias en la exactitud de las estimaciones en relación con los valores observados. Esta variación está asociada con factores geográficos y climáticos específicos de cada estación. Por otro lado, el  $R^2$  revela la capacidad de los modelos para explicar la variabilidad en los datos de precipitación, con valores que oscilan entre 0.643 y 0.805. Esto sugiere diferencias en la capacidad predictiva de las redes neuronales en cada estación, posiblemente relacionadas con la complejidad de los patrones de precipitación locales.

Además, al examinar los cambios en la media aritmética y la desviación estándar antes y después de aplicar el método, se observa una estabilización general o una ligera mejora en la precisión de los datos estimados, indicando una mayor consistencia y fiabilidad en las predicciones generadas por las redes neuronales artificiales.

**Tabla 5.** Evaluación de métodos de generación de datos pluviométricos

Paulhus y Kohler					
Métrica de evaluación	M5028	M5029	M5026	M5076	M5030
RMSE	120.96	69.83	81.77	81.04	69.54
R2	0.026	0.009	0.002	0.000	0.067
Media aritmética antes	113.05	73.25	82.23	68.03	91.31
Media aritmética después	102.95	80.51	86.16	75.60	96.61
Desviación estándar antes	81.04	44.22	51.12	30.84	65.82
Desviación estándar después	73.95	45.42	55.23	40.07	66.18
Regresión lineal múltiple					
Métrica de evaluación	M5028	M5029	M5026	M5076	M5030
RMSE	53.56	26.09	32.67	19.71	25.13
R2	0.672	0.600	0.552	0.727	0.719
Media aritmética antes	113.05	73.25	82.23	68.03	91.31
Media aritmética después	112.27	74.93	83.76	67.99	91.71
Desviación estándar antes	81.04	44.22	51.12	30.84	65.82
Desviación estándar después	76.94	43.44	50.03	28.66	65.32
Transformada de Wavelet					
Métrica de evaluación	M5028	M5029	M5026	M5076	M5030
RMSE	118.96	56.24	94.18	60.75	87.80
R2	0.024	0.074	0.207	0.012	0.253
Media aritmética antes	113.05	73.25	82.23	68.03	91.31
Media aritmética después	101.93	67.30	76.28	61.48	93.64
Desviación estándar antes	81.04	44.22	51.12	30.84	65.82
Desviación estándar después	77.65	47.97	55.63	34.83	66.09
Redes neuronales artificiales					
Métrica de evaluación	M5028	M5029	M5026	M5076	M5030
RMSE	2.14	2.78	1.89	3.41	1.56
R2	0.671	0.782	0.805	0.764	0.643
Media aritmética antes	113.05	73.25	82.23	68.03	91.31
Media aritmética después	114.15	75.20	81.79	67.32	90.58
Desviación estándar antes	81.04	44.22	51.12	30.84	65.82
Desviación estándar después	82.76	44.69	49.67	28.45	64.02

## DISCUSIÓN

La precipitación es un fenómeno ampliamente reconocido como un proceso complejo y no lineal [62]. Esta complejidad se refleja en los altos valores de la raíz del error cuadrático medio y bajos valores del coeficiente de correlación obtenidos mediante el método de Paulhus y Kohler, así como en el análisis realizado mediante la transformada de *Wavelet*. A pesar de las ambigüedades observadas en la implementación de estas metodologías, el uso de herramientas computacionales, como la herramienta *climatol*, ha demostrado ofrecer ventajas significativas. Esta herramienta no solo facilita el relleno de datos faltantes, sino que también permite la homogeneización de las series temporales. De hecho, investigaciones previas, como la de Cartaya et al. [63], han empleado esta herramienta con el fin de homogenizar datos meteorológicos, obteniendo series temporales de mejor calidad. Esta práctica se justifica debido a las posibles discrepancias en la recopilación de datos mediante equipos meteorológicos, lo que puede afectar la fiabilidad estadística de los resultados obtenidos.

Asimismo, el *clustering* jerarquizado de la región de interés proporciona una explicación para ciertas discrepancias y errores en la generación de datos. Sin embargo, Poblete et al. [64] afirman que el enfoque jerárquico utilizado en la formación de los grupos presenta una limitación al generar combinaciones iniciales no deseables que pueden persistir durante el análisis, lo que podría resultar en interpretaciones incorrectas. Para garantizar una mayor confianza en los resultados del análisis de agrupamiento, se requiere realizar múltiples aplicaciones bajo diferentes condiciones, considerando estaciones atípicas como candidatas a revisión, y recalculando los grupos o utilizando diversas medidas de similitud y otros métodos de agrupación [65]. Entonces, se ha demostrado la nula eficacia del método de Paulhus y Kohler para precipitaciones acumuladas mensuales para la presente investigación, sin embargo, en el estudio de Pinthong et al. [19] este método demuestra tener una alta capacidad de generación de datos pluviométricos cuando la escala temporal es diaria, debido a que los errores generados en el recalcular de precipitaciones son más pequeños al tomar tiempos más cortos [66].

Además, la transformada de *Wavelet* mostró limitaciones en la estimación de datos faltantes, lo cual puede atribuirse a la longitud y la naturaleza aleatoria de la serie temporal. Este desafío se acentúa en estaciones recientes, porque la cantidad de datos disponibles es insuficiente. Idealmente, esta técnica se desempeña mejor en bases de datos con más de 30 años, donde la significancia estadística es más sólida [67]. A pesar de eso, la transformada *Wavelet* ofrece descomposiciones valiosas de las series de tiempo originales, lo que permite que los datos transformados en *wavelet* enriquezcan la capacidad de un modelo de pronóstico al capturar información relevante en varios niveles de resolución. Se ha observado que esta metodología parece ser más efectiva que la transformada de Fourier en el tratamiento de series de tiempo no estacionarias, según estudio previo de Salazar [68]. También, Sifuzzaman et al. [69] mencionan que una de las principales ventajas de la transformada de *Wavelet* es su robustez, dado que excluye cualquier sospecha errónea o procedimiento de prueba paramétrica.

Añadido a eso, la regresión lineal múltiple (RLM) presentó una óptima correlación de datos generados. Cabe destacar que, al estar en una misma microcuenca, las estaciones actúan de manera similar, por lo que su papel como variables independientes es muy



utilizada. Sin embargo, es importante considerar la distribución normal de los datos modelados, requisito que no suele cumplirse al trabajar con precipitaciones acumuladas mensuales. Sin este requisito la validación y confiabilidad del modelo son nulas, al ser un modelo multivariado. Alfaro y Pacheco [70] observaron que este método muestra mejoras notables en comparación con los enfoques que dependen únicamente de la información de una estación. A pesar de ello, según Toro et al. [1], se desaconseja la aplicación de métodos de regresión cuando los coeficientes de determinación son inferiores a 0.8. Dado que en este estudio dichos coeficientes están por debajo, se sugiere optar por otro método.

Finalmente, las redes neuronales artificiales representan una estrategia efectiva para estimar la precipitación pluviométrica con mayor precisión, esto es corroborado por la alta correlación entre valores reales y valores simulados, y sus bajos valores de error.

Según Tealab et al. [71], en los últimos años ha habido un crecimiento notable en el interés y la investigación en torno al uso de redes neuronales, lo que ha generado un cuerpo creciente de literatura científica sobre este tema. Este aumento en la atención académica ha resultado en una diversidad de opiniones entre los investigadores, con algunos respaldando entusiastamente el potencial de las redes neuronales y otros señalando sus limitaciones [72]. En el estudio de Baño y Gutiérrez [73] mencionan que la incorporación de un predictor adicional podría potencialmente mejorar los resultados obtenidos. Sin embargo, su aplicación podría desaconsejarse en la elaboración de proyecciones climáticas a largo plazo, dado que algunas variables son altamente parametrizables. Mientras que una limitación podría surgir de la estructura multicapa seleccionada para las redes neuronales artificiales, la cual podría resultar insuficiente en términos del número de capas ocultas. Incrementar su complejidad podría facilitar que el método capture un aprendizaje más profundo de las relaciones físicas entre las variables predictoras y la variable objetivo.

## CONCLUSIONES

Tras evaluar diversos métodos estadísticos y matemáticos para rellenar datos pluviométricos en la microcuenca del río Pita, se observó que las redes neuronales artificiales sobresalieron como el método más efectivo. Estas redes demostraron una alta capacidad de generación de datos pluviométricos, con coeficientes de correlación superiores a 0.6 y una proximidad cercana entre los datos observados y los datos simulados, lo que indica un ajuste adecuado sin caer en sobreajuste. Además, se evidenció que el método de Paulhus y Kohler y la transformada de *Wavelet* presentaron desempeños menos satisfactorios. Se destaca que la longitud de los datos de entrada, que abarcan 10 años de registros mensuales (120 datos en total), tuvo un impacto significativo en la calidad de la transformada de *Wavelet*, lo que sugiere que la cantidad de datos puede influir en la captura y representación de variaciones temporales en los datos. Adicionalmente, la resolución temporal de la información debe considerarse, ya que se ha observado que los datos con resolución mensual pueden limitar la eficiencia. Por otro lado, la regresión lineal múltiple también mostró estimaciones prometedoras, especialmente al considerar la naturaleza multivariada del modelo.



El estudio de generación de datos pluviométricos resalta una brecha en la investigación, particularmente en áreas propensas a sequías e inundaciones recurrentes, subrayando la necesidad de abordar esta problemática a nivel de cuenca o microcuenca hidrográfica para mantener información precisa y actualizada, esencial para la gestión del agua y la mitigación de desastres naturales. Se propone también la generalización de las metodologías desarrolladas en este estudio para su aplicación en otras áreas geográficas, especialmente en zonas de páramo, verificando valores de pluviosidad altos, como es el caso de la microcuenca del río Pita. Esto implica adaptar los modelos y técnicas a las particularidades de cada microcuenca, abordando así la escasez de datos pluviométricos y fortaleciendo la capacidad de respuesta ante eventos climáticos extremos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado a partir de las experiencias adquiridas en el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), particularmente en el Programa de Educación Ambiental (PEA). El conocimiento y las experiencias compartidas por todo el equipo han sido fundamentales para la elaboración de un trabajo científico sobre recursos hídricos, destinado a contribuir a futuras investigaciones en el Distrito Metropolitano de Quito y otras ciudades de Ecuador.

## CONFLICTOS DE INTERESES

Se declara no tener conflicto de intereses en relación a la presente investigación.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

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



## REFERENCIAS

- [1] Toro Trujillo, A. M., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A. y Ibáñez Castillo, L. A. (2017). Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(3). doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i3.640>
- [2] Benítez-Gilbert, M. y Álvarez-Cobelas, M. (2008). Reconstrucción de series temporales en ciencias ambientales. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(3). <http://hdl.handle.net/10261/22205>
- [3] Alfaro, E. J. y Soley, F. J. (2009). Descripción de dos métodos de relleno de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(1). doi: <https://doi.org/10.15517/rmta.v16i1.1419>
- [4] Altamirano, C. y Carrillo, P. (2023). *Comparación de técnicas de relleno de datos faltantes de variables meteorológicas en la provincia de Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/19932>
- [5] Muñoz Herrera, W., Bedoya, O. F. y Rincón, M. E. (2020). Aplicación de redes neuronales para la reconstrucción de series de tiempo de precipitación y temperatura utilizando información satelital. *Revista EIA*, 17(34). doi: <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1292>
- [6] Pérez Pelea, L. (2019). Valores atípicos en los datos, ¿cómo identificarlos y manejarlos? *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 40. <https://revistas.uh.cu/rjbn/article/view/6537>
- [7] Herrera Oliva, C. S., Campos Gaytán, J. R. y Carrillo González, F. M. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 71. doi: <https://doi.org/10.33064/icycuaa201771598>
- [8] Sayl, K., Adham, A. y Ritsema, C. J. (2020). A GIS-based multicriteria analysis in modeling optimum sites for rainwater harvesting. *Hydrology*, 7(3). doi: <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY7030051>
- [9] Cardoso Pereira, S., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C. y Rocha, A. (2020). Extreme precipitation events under climate change in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 40(2). doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6269>
- [10] Carranza, J. M. G., Cortes, M. A. R., Hernandez, L. A. A., Vega, F. C., Vargas, F. L. R., Belmán, J. U. G. y Rangel, J. C. G. (2021). Relleno de datos faltantes en series de datos de precipitación para la ciudad de Guanajuato. *Jóvenes En La Ciencia: XXVI Verano de La Ciencia*, 10.
- [11] Gómez Guerrero, J. S. y Aguayo Arias, M. I. (2019). Evaluación de desempeño de métodos de relleno de datos pluviométricos en dos zonas morfoestructurales del Centro Sur de Chile. *Investigaciones Geográficas*, 99. doi: <https://doi.org/10.14350/riq.59837>
- [12] Palma, K. (2020). *Evaluación del estado del humedal Puglllohuma, perteneciente al Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), mediante análisis de índices espectrales de imágenes capturadas desde una aeronave no tripulada (UAV)* [Tesis Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21131>
- [13] FONAG. (2014). *Caracterización biofísica y socioeconómica de la cuenca alta del río Guayllabamba, con énfasis en las subcuencas de los ríos Pita y San Pedro y las microcuencas de los ríos orientales Papallacta y Antisana*. FONAG.
- [14] Tufiño, S. (2019). *Comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pita: Perspectiva con el modelo de planificación hídrica* [Tesis Ingeniería, Universidad de las Américas]. Repositorio Digital Universidad de las Américas. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/11325>
- [15] Melo Martínez, C. E., Malagón Márquez, D. A. y Ramírez Forero, D. D. (2019). *Interpoladores determinísticos espacio-temporales, series de tiempo y análisis de datos funcionales para el estudio y predicción de la precipitación en Cundinamarca y Bogotá D.C* [Tesis de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas <http://hdl.handle.net/11349/14699>
- [16] OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas N° 100*. Organización Mundial Meteorológica.
- [17] Rhif, M., Abbas, A. Ben, Farah, I. R., Martínez, B. y Sang, Y. (2019). Wavelet transform application for/in non-stationary time-series analysis: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(7). doi: <https://doi.org/10.3390/app9071345>
- [18] Montgomery, K. (2013). Big Data Now. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9). <https://pubs.acs.org/toc/jcis8/53/9>



- [19] Pinthong, S., Dittthakit, P., Salaeh, N., Hasan, M. A., Son, C. T., Linh, N. T. T., Islam, S. y Yadav, K. K. (2022). Imputation of missing monthly rainfall data using machine learning and spatial interpolation approaches in Thale Sap Songkhla River Basin, Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23022-8>
- [20] Portuguese-maurtua, M., Arumi, J. L., Lagos, O., Stehr, A. y Arquiniño, N. M. (2022). Filling Gaps in Daily Precipitation Series Using Regression and Machine Learning in Inter-Andean Watersheds. *Water (Switzerland)*, 14(11). doi: <https://doi.org/10.3390/w14111799>
- [21] A. De Asis, C. (2021). Comparison of Normal Ratio Method and Distance Power Method for Estimating Missing Rainfall Data with Three Neighboring Stations. *Journal of Engineering Research and Reports*. doi: <https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v2i1617469>
- [22] Polpinij, J. y Namee, K. (2021). Comparison of Methods to Estimate Missing Values in Monthly Rainfall Data. *25th International Computer Science and Engineering Conference*. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSEC53205.2021.9684588>
- [23] Curci, G., Guijarro, J. A., Di Antonio, L., Di Bacco, M., Di Lena, B. y Scorzini, A. R. (2021). Building a local climate reference dataset: Application to the Abruzzo region (Central Italy), 1930–2019. *International Journal of Climatology*, 41(8). doi: <https://doi.org/10.1002/joc.7081>
- [24] Papailiou, I., Spyropoulos, F., Trichakis, I. y Karatzas, G. P. (2022). Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression for Filling in Missing Daily Rainfall Data. *Water (Switzerland)*, 14(18). doi: <https://doi.org/10.3390/w14182892>
- [25] Gunawardena, N., Durand, P., Hedde, T., Dupuy, F. y Pardyjak, E. (2022). Data Filling of Micrometeorological Variables in Complex Terrain for High-Resolution Nowcasting. *Atmosphere*, 13(3). doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13030408>
- [26] Liyew, C. M. y Melese, H. A. (2021). Machine learning techniques to predict daily rainfall amount. *Journal of Big Data*, 8(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-02100545-4>
- [27] Afrifa-Yamoah, E., Mueller, U. A., Taylor, S. M. y Fisher, A. J. (2020). Missing data imputation of high-resolution temporal climate time series data. *Meteorological Applications*, 27(1). doi: <https://doi.org/10.1002/met.1873>
- [28] Llamas, R. M., Guevara, M., Rorabaugh, D., Taufer, M. y Vargas, R. (2020). Spatial gap-filling of ESA CCI satellite-derived soil moisture based on geostatistical techniques and multiple regression. *Remote Sensing*, 12(4). doi: <https://doi.org/10.3390/rs12040665>
- [29] Sentop, M. S., Yucel, M. y Ustundag, B. B. (2023). Spatio-Temporal Missing Data Reconstruction by Using Deep Neural Networks in Agricultural Monitoring Systems. *11th International Conference on Agro-Geoinformatics: Agro-Geoinformatics*. doi: <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics59224.2023.10233578>
- [30] Achite, M., Katipoglu, O. M., Şenocak, S., Elshaboury, N., Bazrafshan, O. y Dalkılıç, H. Y. (2023). Modeling of meteorological, agricultural, and hydrological droughts in semi-arid environments with various machine learning and discrete wavelet transform. *Theoretical and Applied Climatology*, 154(1–2). doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04564-4>
- [31] Narimani, R., Jun, C., De Michele, C., Gan, T. Y., Nezhad, S. M. y Byun, J. (2023). Multilayer perceptron-based predictive model using wavelet transform for the reconstruction of missing rainfall data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(7). doi: <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02471-8>
- [32] Vivas, E., de Guenni, L. B., Allende-Gid, H. y Salas, R. (2023). Deep Lagged-Wavelet for monthly rainfall forecasting in a tropical region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(3). doi: <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02323-x>
- [33] Ghamariadyan, M. y Imteaz, M. A. (2021). A wavelet artificial neural network method for medium-term rainfall prediction in Queensland (Australia) and the comparisons with conventional methods. *International Journal of Climatology*, 41(S1). doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6775>
- [34] Park, J., Müller, J., Arora, B., Faybishenko, B., Pastorello, G., Varadharajan, C., Sahu, R. y Agarwal, D. (2023). Long-term missing value imputation for time series data using deep neural networks. *Neural Computing and Applications*, 35(12). doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-08165-6>
- [35] Gholami, V. y Sahour, H. (2022). Simulation of rainfall-runoff process using an artificial neural network (ANN) and field plots data. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1–2). doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03817-4>



- [36] Katipoğlu, O. M. (2022). Prediction of missing temperature data using different machine learning methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1). doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09290-7>
- [37] Ilaboya, I.R. y E. I. O. (2019). Performance of Multiple Linear Regression (MLR) and Artificial Neural Network (ANN) for the Prediction of Monthly Maximum Rainfall in Benin City, Nigeria. *International Journal of Engineering Science and Application*, 3(1).
- [38] Canchala-Nastar, T., Carvajal-Escobar, Y., Alfonso-Morales, W., Loaiza Cerón, W. y Caicedo, E. (2019). Estimation of missing data of monthly rainfall in southwestern Colombia using artificial neural networks. *Data in Brief*, 26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104517>
- [39] FONAG. (2012). Análisis Gobernanza de la Microcuenca de Río Pita. *Fondo Para La Protección Del Agua*. FONAG.
- [40] Andrade, A. y Yépez, H. (2014). *Almacenamiento de agua y cuantificación de carbono en el ecosistema páramo dentro de un esquema Global Environment Outlook (GEO), caso de estudio: Páramo de Pintag-Cuenca Alta del Río Pita* [Tesis Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7386>
- [41] Simbaña, K., Romero, D., Yáñez, G., Benavides, D., & Navarrete, H. (2019). Evaluación de la calidad del agua del río Pita (Ecuador), implicación para la conservación de la vida acuática y silvestre. *InfoANALÍTICA*, 7(2). doi: <https://doi.org/10.26807/ia.v7i2.104>
- [42] Das, K. R. y Imon, A. H. M. R. (2014). Geometric median and its application in the identification of multiple outliers. *Journal of Applied Statistics*, 41(4). doi: <https://doi.org/10.1080/02664763.2013.856385>
- [43] Maharana, K., Mondal, S. y Nemade, B. (2022). A review: Data pre-processing and data augmentation techniques. *Global Transitions Proceedings*, 3(1). doi: <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2022.04.020>
- [44] Barrera-Escoda, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España* [Tesis Diploma de Estudios Avanzados, Universidad de Barcelona]. Grupo de Análisis de situaciones Meteorológicas Adversas. <https://zucaina.net/Publicaciones/barrera-dea.pdf>
- [45] Guijarro, J. (2023). *Guía de uso del paquete de R climatol (versión 4)*. Climatol. <https://www.climatol.eu/climatol4.1-es.pdf>
- [46] Montero, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. *Documentos de Trabajo En Economía Aplicada*, 3(12). [https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion\\_lineal.pdf](https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf)
- [47] Hui, E. G. M. (2019). *Learn R for Applied Statistics*. APRESS. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4200-1>
- [48] Gamboa, R. (2015). *Evaluación de modelos empíricos matemáticos y redes neuronales para estimar datos faltantes en estaciones meteorológicas en México* [Tesis, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas]. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. [http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2621/Gamboa\\_Chel\\_RO\\_MC\\_Hidrociencias\\_2015.pdf?sequence=1](http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2621/Gamboa_Chel_RO_MC_Hidrociencias_2015.pdf?sequence=1)
- [49] Quiroz, R., Yarlequé, C., Posadas, A., Mares, V. y Immerzeel, W. W. (2011). Improving daily rainfall estimation from NDVI using a wavelet transform. *Environmental Modelling and Software*, 26(2). doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.07.006>
- [50] Ilyas, H., Raja, M. A. Z., Ahmad, I. y Shoab, M. (2021). A novel design of Gaussian Wavelet Neural Networks for nonlinear Falkner-Skan systems in fluid dynamics. *Chinese Journal of Physics*, 72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2021.05.012>
- [51] Katsavrias, C., Papadimitriou, C., Hillaris, A. y Balasis, G. (2022). Application of Wavelet Methods in the Investigation of Geospace Disturbances: A Review and an Evaluation of the Approach for Quantifying Wavelet Power. *Atmosphere*, 13(3). doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13030499>
- [52] Zamrane, Z., Mahé, G. y Laftouhi, N. E. (2021). Wavelet analysis of rainfall and runoff multidecadal time series on large river basins in western north africa. *Water (Switzerland)*, 13(22). doi: <https://doi.org/10.3390/w13223243>
- [53] Santamaría, F., Cortés, C. A. y Román, Y. F. J. (2012). Uso de la transformada de ondeletas (wavelet transform) en la reducción de ruidos en las señales de campo eléctrico producidas por rayos. *Informacion Tecnologica*, 23(1). doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100008>
- [54] Paparoditis, E. (2010). Wavelet Methods in Statistics with R. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 173(1). doi: [https://doi.org/10.1111/j.1467-985x.2009.00624\\_7.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-985x.2009.00624_7.x)

- [55] Lantz, B. (2015). *Machine Learning with R: Second Edition*. Packt Publishing. <https://www.oreilly.com/library/view/machine-learning-with/9781784393908/>
- [56] Franklin, J. (2005). The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. In *Mathematical Intelligencer*, 27(2). doi: <https://doi.org/10.1007/BF02985802>
- [57] Dangeti, P. (2017). *Statistics for Machine Learning: Techniques for exploring supervised, unsupervised, and reinforcement learning models with Python and R*. Packt Publishing. <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/3164859>
- [58] Toral, J. (2012). *Redes Neuronales*. Universidad de Guadalajara.
- [59] Raschka, S. y Mirjalili, V. (2019). *Python Machine Learning. Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2*. Packt Publishing. [https://books.google.com.ec/books/about/Python\\_Machine\\_Learning.html?id=sKXIDwAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ec/books/about/Python_Machine_Learning.html?id=sKXIDwAAQBAJ&redir_esc=y)
- [60] Sánchez, N. (2020). *Estudio comparativo de modelos de predicción estocásticos y heurísticos aplicados a la estimación de la calidad del aire*. Universitat Oberta de Catalunya.
- [61] Ortega, R. M. M., Pendás, L. C. T., Ortega, M. M., Abreu, A. P. y Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlacion de los rangos de spearman caracterizacion. *Revista Habanera de Ciencias Medicas*, 8(2). <https://www.redalyc.org/pdf/1804/180414044017.pdf>
- [62] Ali, S. y Shahbaz, M. (2020). Streamflow forecasting by modeling the rainfall– streamflow relationship using artificial neural networks. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3). doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00780-3>
- [63] Cartaya, S., Zurita, S. y Montalvo, V. (2016). Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para determinar índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador. *La Técnica: Revista de Las Agrociencias*. ISSN 2477-8982, 16. doi: [https://doi.org/10.33936/la\\_tecnica.v0i16.540](https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i16.540)
- [64] Poblete, D., Arevalo, J., Nocolis, O. y Figueroa, F. (2020). Optimization of hydrologic response units (Hrus) using gridded meteorological data and spatially varying parameters. *Water (Switzerland)*, 12(12). doi: <https://doi.org/10.3390/w12123558>
- [65] Krlježa, D., Vrdoljak, B. y Brčić, M. (2021). Statistical hierarchical clustering algorithm for outlier detection in evolving data streams. *Machine Learning*, 110(1). doi: <https://doi.org/10.1007/s10994-020-05905-4>
- [66] Xu, L., Chen, N., Moradkhani, H., Zhang, X. y Hu, C. (2020). Improving Global Monthly and Daily Precipitation Estimation by Fusing Gauge Observations, Remote Sensing, and Reanalysis Data Sets. *Water Resources Research*, 56(3). doi: <https://doi.org/10.1029/2019WR026444>
- [67] Kuriqi, A., Ali, R., Pham, Q. B., Montenegro Gambini, J., Gupta, V., Malik, A., Linh, N. T. T., Joshi, Y., Anh, D. T., Nam, V. T. y Dong, X. (2020). Seasonality shift and streamflow flow variability trends in central India. *Acta Geophysica*, 68(5). doi: <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00475-4>
- [68] Salazar, A. (2019). *Estimación de niveles medios diarios en estaciones específicas en el río Magdalena a partir de esta variable en estaciones de aguas arriba y de afluentes mediante relaciones empíricas. Casos de estudio: Purificación, Puerto Berrio y Calamar* [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/43914>
- [69] Sifuzzaman, M., Islam, M. R. y Ali, M. Z. (2009). Application of Wavelet Transform and its Advantages Compared to Fourier Transform. *Journal of Physical Sciences*, 13. [https://www.researchgate.net/publication/242602743\\_Application\\_of\\_Wavelet\\_Transform\\_and\\_its\\_Advantages\\_Compared\\_to\\_Fourier\\_Transform](https://www.researchgate.net/publication/242602743_Application_of_Wavelet_Transform_and_its_Advantages_Compared_to_Fourier_Transform)
- [70] Alfaro, R. y Pacheco, R. (2000). Aplicación de algunos métodos de relleno a series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 7. [https://www.researchgate.net/publication/237217878\\_Aplicacion\\_de\\_algunos\\_metodos\\_de\\_relleno\\_a\\_series\\_anuales\\_de\\_lluvia\\_de\\_diferentes\\_regiones\\_de\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/237217878_Aplicacion_de_algunos_metodos_de_relleno_a_series_anuales_de_lluvia_de_diferentes_regiones_de_Costa_Rica)
- [71] Tealab, A., Hefny, H. y Badr, A. (2017). Forecasting of nonlinear time series using ANN. *Future Computing and Informatics Journal*, 2(1). doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2017.05.001>
- [72] García Valero, J. A. (2021). *Redes Neuronales Artificiales. Aplicación a la regionalización de la precipitación y temperaturas diarias*. Agencia Estatal de Meteorología AEMET. doi: <https://doi.org/10.31978/666-20-028-5>
- [73] Baño-Medina, J. y Gutiérrez, J. M. (2018). *Deep Convolutional Neural Networks For Feature Selection in Statistical Downscaling*. 8th International Workshop in Climate Informatics.

## Exploratory Study on Value Proposition Barriers for Civil Engineering Entrepreneurships - Pilot Study

Miguel Vélez<sup>1\*</sup>, Mauricio Baldajos<sup>1</sup>, Alejandro Toscano<sup>1</sup>, Leonela Solorzano<sup>1</sup>, Miguel Andrés Guerra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil, Casilla Postal 17-1200-841, Quito 170901, Ecuador.

\*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: [avelez@estud.usfq.edu.ec](mailto:avelez@estud.usfq.edu.ec)

## Estudio exploratorio sobre las barreras de la propuesta de valor para las empresas de Ingeniería Civil -Estudio piloto

### Abstract

This research analyzes how business models arise for people, specifically civil engineers, who want to start their own business based on construction and who want to establish their own Ecuadorian company. Small, medium, and large construction companies were taken as a reference. For this, surveys were conducted with eight companies, and the questions were based on adequately knowing personal barriers, how they can be overcome, and effectively knowing the value propositions and qualities that should be emphasized. The results obtained from this research show that most people within this industry face different personal barriers, both when wanting to communicate their ideas and when having confidence in themselves. In the same way, limitations were found, as well as how to know how to take advantage of them. Also, thanks to this, it is highlighted that the greatest competitive advantage is creativity and that it is necessary to have superior quality and decent prices both at the public and private level to stabilize at a good level compared to other companies. Finally, it is observed that within large, medium, and small companies there are personal barriers on the part of civil engineers, which disappear on a day-to-day basis, and that the best way to move forward is to try to improve day by day and not remain stagnant with something that can be optimized or improved in several ways.

**Keywords:** Obstacles, competitive advantage, anxiety, Civil Engineer, entrepreneurship

### Resumen

Esta investigación analiza cómo surgen los modelos de negocio para las personas, específicamente ingenieros civiles, que quieren iniciar su propio negocio basado en la construcción y que desean establecer su propia empresa ecuatoriana. Se tomó como referencia a pequeñas, medianas y grandes empresas constructoras; 8 de las cuales fueron encuestadas. Las preguntas se basaron en conocer adecuadamente las barreras personales, cómo superarse, y entender efectivamente las propuestas de valor y cualidades que se deben resaltar. Los resultados obtenidos de esta investigación muestran que la mayoría de las personas dentro de esta industria se enfrentan a diferentes barreras personales, tanto a la hora de querer comunicar sus ideas como a la hora de tener confianza en sí mismos. De la misma manera, se encontraron limitaciones y cómo aprovecharlas. También, gracias a esto, se destaca que la mayor ventaja competitiva es la creatividad y que es necesario tener una calidad superior y precios



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



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

Recibido /  
Received:  
17/05/2023

Aceptado /  
Accepted:  
22/12/2023

Publicado en línea /  
Published online:  
13/05/2024



decentes tanto a nivel público como privado para estabilizarse en un buen nivel en comparación con otras empresas. Por último, se observa que dentro de las grandes, medianas y pequeñas empresas existen barreras personales por parte de los ingenieros civiles, las cuales desaparecen en el día a día, y que la mejor manera de avanzar es tratar de mejorar día a día y no quedarse estancado con algo que se puede optimizar o mejorar de varias maneras.

**Palabras clave:** Obstáculos, ventaja competitiva, ansiedad, ingeniero civil, iniciativa empresarial

---

## INTRODUCTION

Anxiety and lack of motivation have always been problems for entrepreneurs, who fear being judged and criticized [1]. Blockages are a common problem in people who want to undertake a new project. In the same way, and despite what can be assumed, it is difficult to break these blocks to have freedom of thought. This is basically because the intrinsic problem and thoughts cause this blockage. The risk faced by entrepreneurs who suffer from this blockage is that they can remain stagnant, without allowing themselves and their initiatives to advance in their professional life and developing anxieties, frustration, and even depression.

Currently the existence of emotional and psychological problems in workers is more noticeable. In contrast to the past, awareness of the anxiety that exists today is much greater than it was in the past. This has led to the study of the locus of these problems. This problem is latent in most independent entrepreneurs and those who want to start an independent company after leaving another [2]. The main locus is newly graduated civil engineers who do not know how to start their own company. This is due to several factors, which may be specific to the person or external. An example of this is the experience required to start a job; experience involves knowledge, so a lack of experience can cause insecurity in a person's knowledge. In other words, a newly graduated civil engineer feels insecure about their knowledge and is afraid to encourage wrong ideas.

In this investigation, it has been noted that recent graduates of the civil engineering profession, alongside already established civil engineers, encounter social and personal impediments that hinder the realization of their endeavors according to their aspirations. This hindrance primarily stems from a sense of stagnation wherein ideas fail to progress optimally. Specifically, it is acknowledged that the value propositions extended by these enterprises and/or companies often parallel those already manifest or within the purview of knowledge possessed by other firms.

The first research question is: What are the personal barriers in an enterprise? This is answered by considering that personal barriers have a great responsibility at work, generating a great limitation in job growth. On the other hand, the second research question is: How does one stand out from other competitors? This question is answered considering that one seeks to have privilege in the market and position oneself correctly in it to achieve profits over time.

## BACKGROUND/Framework

Starting a new business is challenging because it is often unclear where to start and how to make the business known to everyone. Stress and work overload tend to dampen creative thinking. In periods of high stress, creativity is at a minimum [3]. This opens barriers to creativity, also known as personal or social blocks or limitations. They are psychological barriers that prevent constituting new ideas [4]. Barriers are blocks that inhibit creativity. There are certain obstacles that nullify the ability to invent, and this can lead to a state of frustration, which can be aggravated by the persistence of the situation [5]. The most common barriers are usually personal, since they are communication interferences that come mainly from the emotions, values, and habits of the person. These are of a mental nature because they influence blockages of thought and emotions. These personal barriers relate to the factors that are personal to the sender and receiver and act as a hindrance in the communication process [6].

The personal barriers on which this research focuses are i) lack of concentration, which is difficulty in thinking clearly, focusing on a goal, or keeping attention on something [7]. This is the most common block that exists in people and even more so in professionals when generating ideas [4]; ii) anxiety, which is one of the most common limitations of creativity in society and is a feeling of fear, dread, and uneasiness that might cause sweat and feeling restless and tense [8]; iii) stress and exhaustion, barriers that affect professional growth due to the limitation of ideas. Stress is a state of physical and emotional tension originating as a reaction to a stimulus or pressure, whether positive or negative [9], and exhaustion is a state of physical or emotional fatigue that also implies a feeling of reduced achievement and loss of personal identity [10]. This is a response from the brain and the nervous system and can be either positive when it helps to prevent some danger or detrimental to health when it lasts for a long time [4]; iv) lack of motivation limits the flow of the mind, forcing people to feel withdrawn, without ideas, stressed, and thus damaging mental health. Also known as demotivation, it is the lack of the driving force that allows taking necessary actions [11]. Social blocks are barriers that have to do with the environment in which people are born and develop. Therefore, they prevent thinking clearly and affect the actions of daily life [12]; v) the fear of being wrong is the fear that people have because they are afraid of making a fool of themselves for making mistakes, since society seeks perfection [13]; vi) the fear of change is generated by being used to a routine and not wanting to get out of it for fear of what could happen [14]. Everyone is afraid of the possibility of trying to change and failing in the process, given the idea of taking the reins of life and being responsible for their own actions [15]. These barriers make the outlook cloudy, which is why we must identify and understand how to overcome them to obtain a clear and well-structured idea that allows the company to have an identity. Said identity can be known as the value proposition which is considered as the element that differentiates it from the competition and promotes the development of the enterprise, since it motivates the consumer to choose one product over another [16].

The value proposition starts from the concept of an original idea, which is considered as the element that differentiates one's products from the competition and promotes the development of the venture, since it motivates the consumer to choose one product over another [16]. Due to the attractive and lasting characteristics, it is possible to create an advantage over the competition; however, the idea alone is not enough





for the venture to succeed. For it to achieve success, it must be accompanied by a good business plan and model [17]. It is difficult to find the idea that perfectly fits the consumer's need, which is why the client must be understood and owners should try to reach a balance between the benefits achieved for the client and for the company. The competitive advantage is conceived as the way in which factors are added that give authenticity and differentiation to the company with respect to its competitors, so that said company can obtain a superior positioning in the market thanks to the creation of additional value for consumers, which is unique and unrepeatable by the competition [18]. Competitive advantages make the company recognizable in the market and protect it from the effects of competitive forces. Competitiveness is the result, fixing the presence of competitive advantages, without which it is impossible [19].

In the same way, the value proposition is the set of products, services, benefits, and added value that the company offers to the consumer, after having carried out a market study to make an option that helps to anticipate the competition and the market [20]. It is important to consider that the entrepreneurship process is the set of activities to form a value proposition, based on the efforts of risky people who have worked together to give value to a product or service [21].

In order to direct employees to the benefits that are wanted to deliver to the consumer, certain characteristics must be met: demonstrate the quality, functionality, image, service, and price offered to the customer; report on issues of expectations, risks, and delivery times; state the differential characteristic of the company; understand the elements that attract potential buyers and characteristics that reflect the company to customers; be simple and concise so that the consumer can easily understand the benefits of the company; and look for customer loyalty [22]. An important benefit is to identify the key element that differentiates the business, which is important when building the value proposition. This will lead to the development of communication, marketing, and sales plans that focus on the strengths and the main points that distinguish the company from the rest [23].

The competitive advantage seeks to excel in the competition and in the aspects and characteristics of other companies [24]. It can be divided into internal and external competitive advantages. The internal competitive advantage occurs when the product has the same quality as the competition, but its value is lower. The external competitive advantage includes factors such as better quality, loyalty prizes, promotions, and others [25]. With the competitive advantage there is a basis to define the value proposition, and with this defined it is known what is going to be made known to customers about products or services, so the competitive advantage is directly related to the marketing strategy [26].

## METHODS

The aim of this research is to determinate the primary obstacles in establishing a competitive entrepreneurship or company. The objective is to assist emerging construction entrepreneurs in initiating their enterprises from the ground up and aid owners of civil engineering-related companies in enhancing their businesses. This





involves a comprehensive consideration of their value propositions and competitive advantages in relation to other companies.

The undertaken study seeks to diminish barriers to creativity and enhance competitive advantage and value propositions relative to other companies. Initially, comprehensive presentations were recorded, elucidating essential topics to facilitate comprehension of methods for improvement and the commencement of a company. This was carried out between June and July of the year 2022. The other part of the study was carried out on various civil engineering companies and civil engineers within Ecuador. Data collection was conducted between August and September of the year 2022. Here, surveys were carried out with six questions referring to the barriers of creativity and six questions referring to the value proposition and competitive advantage, to find out what blocks civil engineers have and what competitive advantages and value propositions they have on other companies and engineers. The survey questions were designed by the research team and were guided by existing literature. For the methodology we used a survey instrument with semi-structured questions.

Each of the presentations lasted approximately 45 minutes, and a total of 16 of these were performed. The interviewers were civil engineers between 28 and 50 years old and were chosen according to their field of expertise in engineering business in Ecuador. All interviews were transcribed one by one and then color coded for content analysis. Clusters focused on entrepreneurship and innovation, barriers to creativity, the value proposition, and the competitive advantage.

The sets of questions were divided into two parts—the first with six questions about personal barriers, and the second with six questions about value proposition and competitive advantage. Eleven of the survey answers were in the interviewees' own words; only one of the twelve questions was of multiple choice, but at the same time they had to argue why they gave that answer. This key question for the study was to choose whether they completely agree, agree, neither agree nor disagree, disagree, or completely disagree with some barriers to creativity, which are stress and exhaustion, anxiety, lack of concentration, lack of motivation, fear of making a mistake, and fear of change, to understand which are the greatest blockages of engineers and, in turn, which have their greatest strengths.

Once all the interviews carried out with eight civil engineers were obtained, the interviews were transcribed one by one to be clearer about what was discussed in each one. With this, it was possible to compare responses and get a joint response from all the interviews. It was also possible to conclude more clearly the pros and cons of people in their companies related to civil engineering and how they can have a greater advantage over others.

## RESULTS

The first question of this study was *“What are the personal barriers in a venture?”* The main answer is that personal barriers have a great responsibility in work, generating a strong limitation on labor growth.



**TABLE 1.** What are the personal barriers in a venture?

They are the limitation in labor growth. They have a great responsibility in the work.	
a. Emerge from a series of bad experiences or from the way in which a recently graduated professional assimilates.	Lack of motivation
	Anxiety
b. Necessary to identify the limitations to know how to improve professionally.	Lack of concentration
	Stress and exhaustion
	Fear of making mistakes
	Fear of change

Firstly, these barriers stem from a series of bad experiences or the way a newly graduated professional assimilates information. This is attributed to a deficiency in motivation, as the prospect of undertaking and advancing seems nearly insurmountable. Furthermore, the role of being a civil engineer is pivotal, requiring ingenuity and adeptness in discerning how to progress and identifying potential courses of action. According to interviewee 1, *“In very few occasions I had lack of motivation because if there is no motivation you cannot get ahead.”* Similarly, according to interviewee 2, *“Lack of motivation is something that affects your productivity when you start working and this is due to the fear of failing and disappointing our loved ones, but you always have to keep in mind that if someone else can, why not me?”* And finally taking into account interviewee 3, *“(…) the lack of motivation can be linked to a negative environment because, in our midst certain circumstances prevail because everything is done with money, then the money through the banks, and financial institutions can sometimes disengage with the flows and the work schedule for lack of cash flow, then those are the problems that one is exhausting and one is stressed.”*

Anxiety assumes a significant role, particularly when delivering, presenting, or publicizing projects. It is customary to experience anxiety concerning potential feedback or the mere anticipation of whether the audience will appreciate the showcased content. However, it is crucial to possess coping mechanisms that aid in managing this anxiety during presentations, fostering self-confidence in effectively conveying the intended message. According to engineer interviewee 3, *“I agree, and anxiety can be of medium type. Then we beat this anxiety by investing more time in the basis of the production and how to develop projects, or further breaking down each item such as the budget or any of the activities to be developed.”* Now considering what interviewee 4 says, *“If I have anxiety when presenting a new project, it is because there is always the doubt that something may not fulfill the customers.”* And finally, interviewee 5 says, *“At some point I have had anxiety, for example when presenting a project to a client or during the bidding process at the Sercop.”*

At some point in our lives, we all must have lacked concentration, but when applying professional life there is a great responsibility behind us as civil engineers. For this reason, lack of concentration is not an option because this can bring great short- and long-term effects.

According to interviewee 1, *“It has not happened to me, but I would say that as civil engineers, we have a great responsibility behind us, so the lack of concentration is not admitted.”* Considering interviewee 6, *“I never had a lack of concentration, but it is something that affects a large majority of engineers, but you always have to try to improve this because of the affectations that may have in our work (…).”* Similarly, according to interviewee 2, *“At*



*first I had a lack of understanding, which made it a little difficult to work, but after 11 years of exercising I learned to focus without distractions on what I do."*

Secondly, it is necessary to identify the limitations to know how to improve professionally. Based on surveys carried out previously, it is known that most civil engineers agree that in most of their professional lives they have suffered or suffer from stress and exhaustion that has been difficult for them to control, and this is due to the charges that are applied through high demand as a professional. According to interviewee 7, *"I think all people at some point in their working life have suffered from stress from different factors starting with food, working in groups, among other factors."* According to interviewee 2, *"Whenever I have to present a project, I have enough exhaustion and stress until I manage to give it everything I ask, but once I do, my goal becomes rest for a while so I can do my other projects quietly."* Now according to interviewee 6, *"Stress has been part of professional life as civil engineers and construction professionals. The calendar has always been our worst enemy, because we already plan dates and suddenly, we do not reach the deadlines. We must have a great planning of work, great planning because stress is part of us and we must avoid such collapses, ask for help from specialists to review several times the project. The paper resists everything, while in the practical part the problems are much bigger both in time and in costs. Time is money and for that reason we must avoid such problems."*

In the same way, it is normal to be afraid of making mistakes, so when you are in a construction, when making cost analysis or doing laboratory tests, there will always be a fear of making mistakes, since these errors can be very expensive. However, you have to be risky and throw yourself into what you do because this is how you achieve success. According to interviewee 3, *"Fear is permanent because fear requires you to prepare better, because when you prepare, you have better knowledge, fear you already take differently. No longer take it as fear but as what is called risk. Then we as professionals avoid it because if we were afraid, we could not keep our customers and we could not fulfill the works. Then it is normal fear, but better call it risk."* According to interviewee 7, *"Always before making any construction you are afraid to make mistakes, but it is a risk that as engineers we must face."* And now considering interviewee 1, *"At the beginning I was afraid of making a mistake in the calculations when making a building, but nowadays and thanks to the experience I have I no longer feel this fear."*

The most common thing is that there is fear of change, but you must always be innovating and looking for new things to be more efficient and reach everyone more easily; if you stay in the past without constant innovation, you will not have a great reach in the public. According to interviewee 2, *"I have not been afraid to discover the new; I like facing the new changes."*

Interviewee 3 says, *"I have been an engineer for 43 years. Had I had the fear of change, I would not have succeeded in this industry; technology is an example because as it progresses, we become outdated and we do not have the ability to continue with technology, so we are less productive than the new professionals who already have a lot of skill in using technology. For that reason, we either go to vocational training to update our skills or we partner/hire people with such skills."*

The second question of this study was *"How does one stand out from other competitors?"* The main answer to this question is by seeking to have prestige in the market and position oneself correctly in it to achieve profit over time.

**TABLE 2.** How does one stand out from other competitors?

The aim is to have greater prestige in the market and a better positioning in it to achieve profits over time.	
a. To stand out from other competitors, the main competitive advantage is quality.	Quality product
	They call more attention
b. It's necessary to have young staff and learn from foreign companies.	Best prices
	Innovative ideas
	Updated in programs and digital tools
	Best construction methods

Firstly, current entrepreneurs share the idea that the main competitive advantage is quality, since if customers do not obtain a quality product, they do not hire that company again; or that many times the customer chooses a lower quality product due to its lower cost, but this does not work for them, so they go back to the company with better quality. In addition, they consider that customer service goes hand in hand with quality. They also consider that the products attract the attention of customers from the beginning so that in this way they are hooked. According to interviewee 3, *"Today in our environment it is very important that each of the companies behave professionally. There are direct and indirect costs where the indirect costs allow you to negotiate with the competition if one is efficient and by the repetition of having developed the projects. One can manage indirect costs and try to manage with a rational equilibrium point. Indirect costs may range from 18 to 25%. So today some of these indirect costs become contributions to tax and endless so much so that the current profitability every day is reduced. For that reason we must avoid making mistakes in the waste of materials. Only then can resources be optimized."*

Secondly, you need young staff and to learn from foreign companies. All this helps to have innovative ideas which are appreciated when starting a venture. A lot of young staff are also used, since they are up-to-date on digital programs and tools that help the company innovate, although many times they lose a bit of credibility due to lack of experience, which endangers the market. According to interviewee 8, *"In our environment as it is Yantzaza, a small and new canton that is growing, all new technologies are of utmost importance in addition to people always seeking to be hand in hand with trends. That is why many people have emigrated to other countries around the world in search of these and have achieved it by bringing new ideas, equipment, polishers, among others. For this great competition, each person if they can travel and bring ideas would greatly help their company to innovate and in such a way not jeopardize the position in the market."*

In the process of being a participant in a construction project, there will always be new construction methods since not every project is the same; construction challenges will always arise. These challenges may be related to the way or speed of resolving a problem related to the project, such as project delivery in the established time or resolving the supply of material so that the project is executed properly. In order to get to this point of knowing how to solve any type of problem in a construction project, you must go through a beginning and learn from more experienced professionals from whom you can take advantage of their teachings to refine the knowledge taught at the university,



as well as new techniques that are a complement to the constructive techniques and knowledge that are acquired throughout professional life. It is important to bear in mind that it is never wrong to ask and be wrong. According to interviewee 3, *“Nowadays in our environment it is very important that each company and each professional has their direct and indirect costs, where indirect costs allow you to negotiate with the competition.”*

## DISCUSSION

The first issue that came across was personal barriers to entrepreneurship, considering that personal barriers have a great responsibility at work and that these generate great limitations when wanting to grow and improve; when you want to start a new business, you do not have a clear idea of where you want to start and how to make this known [3].

Currently, one of the greatest post-pandemic effects is anxiety, which plays a very important role; it is more common than believed to go through anxiety when wanting to present, deliver, or advertise a project for all that this entails [8]. That is why we must rely on something or someone when publicizing a project to show greater confidence in yourself.

Another personal barrier on which this research is based, and the most common block, is lack of concentration. It must be considered when applying it in our career; lack of concentration cannot be an option because this can cause failures to exist when doing a project, which can generate big problems in the short and long term [7].

Together with the surveys that were conducted previously, it was taken as data that most civil engineers have suffered or suffer from stress and exhaustion due to the great loads that are applied to them while they have studied and at work, since there is a high demand in the professional field. Stress and exhaustion are barriers that affect professional growth due to the limitation of ideas. This is a response from the brain and the nervous system and can be either positive when it helps to prevent some danger or detrimental to health when it lasts for a long time [4].

The fear of being wrong is the subconscious fear of making a fool of ourselves by making mistakes, because society always seeks perfection in others [15], but this is normal, and one must learn to be risky because this is the way to achieve success. In the same way, another fear is change, because you get used to the old ways of doing or using things, but you must always be innovating and looking for new things and opportunities to stand out from the competition and, likewise, reach everyone more easily [14].

Now, when talking about the best way to stand out against the competitors, you must seek prestige in the market and position yourself correctly to achieve better profits and be efficient in constructions. As mentioned earlier, in order to direct employees to the benefits that you want to deliver to the consumer, certain characteristics must be met, such as demonstrating the quality, functionality, image, service, and price offered to the customer; reporting on issues of expectations, risks, and delivery times; stating the differential characteristic of the company; understanding the elements that attract potential buyers and characteristics that reflect the company to customers; being simple and concise so that the consumer can easily understand the benefits of the company; and looking for customer loyalty [25].



Current businesspeople share the idea that the main competitive advantage is quality and price because customers prefer to have superior quality products to be satisfied and to be able to trust that company for future contracts. You also need to have young staff and learn from companies abroad to apply all the knowledge they will have in the future in other constructions [18].

## CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In conclusion, personal barriers like anxiety and lack of motivation have always been a challenge for entrepreneurs. These barriers can lead to blockages, which can prevent individuals from advancing in their professional lives and lead to anxiety, frustration, and depression. While emotional and psychological problems are becoming more noticeable among workers, particularly among independent entrepreneurs, recent graduates of civil engineering face personal barriers that prevent them from starting their own businesses. These barriers can result from a lack of experience or knowledge, or the perception that the value proposition they offer is not unique. To overcome these challenges, individuals must address their personal barriers and find ways to differentiate themselves from competitors in the market. By doing so, they can position themselves for success and achieve long-term profitability. In terms of standing out from competitors, it is crucial to have a clear value proposition that sets the business apart from others in the market. This can involve offering unique products or services, targeting a specific niche or audience, or utilizing innovative marketing strategies to create a strong brand identity.

Additionally, entrepreneurs must be adaptable and willing to pivot their strategies as needed to remain competitive and meet the evolving needs of their customers. For future work, it is necessary to consider how to reduce the stress and overcome personal barriers by adding value propositions. For this, we will revise the written project proposals of the companies and our interviewees' work and conduct a content analysis to identify patterns for competitive advantages and their connections to new customers.

## ACKNOWLEDGMENTS

To the civil engineers who gave part of their time to answer the interview questions, allowing us to collect the required information.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

A.V. wrote the manuscript. A.V., M.B., L.S., and A.T. collected data and conducted the interviews. M.A.G. supervised the project and revised the manuscript.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest in relation to the publication of this article.

## REFERENCES

- [1] Jiménez, A. (2019). *Problemas de salud mental, una condición común en los emprendedores*. Worteb. <https://worteb.com/inspiracion/problemas-de-salud-mental-una-condicion-comun-en-los-emprendedores/>
- [2] Solís, P. (2018). *La ansiedad y falta de motivación*. Universidad de Panamá.
- [3] Ferman, C. (2021). *Las barreras del pensamiento creativo*. Marketing Directo. <https://www.marketingdirecto.com/marketing-general/tendencias/las-barreras-del-pensamiento-creativo>
- [4] Alcaraz Rodríguez, R. (2011). *El Emprendedor del Éxito*. Editorial Mc Graw Hill. <https://fr.scribd.com/doc/282951084/Alcaraz-Rodriguez-Rafael-2011-El-emprendedor-de-exito-4ta-Edicion-Mexico-Editorial-McGraw-Hill>
- [5] MonoGráfica. (2018). *Barreras de la creatividad: Cómo fomentar el pensamiento creativo*. MonoGráfica. <https://monografica.es/barreras-de-la-creatividad-como-fomentar-el-pensamiento-creativo/>
- [6] Silwiza, K. (2019). *Personal Barriers*. Business Jargons. <https://businessjargons.com/personal-barriers.html>
- [7] Legg, T. (2019). *What Makes You Unable to Concentrate?* HealthLine. <https://www.healthline.com/health/adhd/three-types-adhd>
- [8] MedlinePlus. (2020). *Anxiety*. MedlinePlus. <https://medlineplus.gov/anxiety.html>
- [9] Angustias, M. (2021). *¿Qué es el estrés?* TopDoctors. <https://www.topdoctors.es/diccionario-medico/estres#:~:text=El%20estr%C3%A9s%20es%20un%20estado,y%20adaptarse%20a%20los%20acontecimientos>
- [10] Albrecht, S. (2021). *¿Qué es el agotamiento?* Those Nerdy Girls. <https://thosenerdygirls.org/que-es-el-agotamiento/>
- [11] Bratch, M. (2019). *Desmotivación: cuando perdemos el impulso a mitad del Camino*. El Prado psicólogos. <https://www.elpradopsicologos.es/depresion/desmotivacion/>
- [12] Castro, M. (2022). *Bloqueo emocional: En qué te puede ayudar la terapia*.
- [13] Fernández, V. (2023). *Miedo a equivocarse: cómo superarlo y avanzar*. Webconsultas. <https://www.webconsultas.com/mente-y-emociones/emociones-y-autoayuda/por-que-tenemos-miedo-a-equivocarnos>
- [14] WellWo. (2021). *¿Cómo afrontar el miedo al cambio?* WellWo <https://wellwo.es/miedo-al-cambio/>
- [15] López, G. (2021). *El temor al cambio*. Psicólogos. <https://psicologosprincesa81.com/el-temor-al-cambio/>
- [16] Santos, D. (2023). *Propuesta de valor: Qué es, cómo se hace y ejemplos*. HubSpot. <https://blog.hubspot.es/marketing/crear-propuesta-de-valor>
- [17] Osterwalder, A. & Pigneur, Y. (2015). *Diseñando la propuesta de valor*. Deusto. [https://sinca.gob.mx/pdf/comunidad/Resumen\\_propuesta\\_de\\_valor.pdf](https://sinca.gob.mx/pdf/comunidad/Resumen_propuesta_de_valor.pdf)
- [18] Pursell, S. (2022). *Ventaja competitiva*. HubSpot. <https://blog.hubspot.es/marketing/ventaja-competitiva>
- [19] CEUPE. (2022). *¿Qué es la ventaja competitiva?* CEUPE. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-ventaja-competitiva.html>
- [20] Fiz, I. (2021). *Qué es y Cómo Crear Tu Propuesta de Valor Irresistible*. Escuela de Copywriting y Redacción de Contenidos. <https://ivofiz.com/propuesta-de-valor/>
- [21] Berenstein, M. (2018). *El proceso emprendedor*. Emprendedores News. <https://emprendedoresnews.com/tips/el-proceso-emprendedor.html>
- [22] Rankmi. (2019). *Qué tipos de ventajas competitivas existen en las empresas actuales*. Rankmi. <https://www.rankmi.com/blog/que-son-y-que-tipos-de-ventajas-competitivas-existen-en-las-empresas-actuales>
- [23] Taboada, M. (2020). *Ventaja Competitiva: ¿Qué es y qué Beneficios trae?* Genwords. <https://www.genwords.com/blog/ventaja-competitiva/>
- [24] Matesanz, V. (2021). *El buen trato al cliente, la clave de una empresa*. Forbes. <https://forbes.es/empresas/4987/el-buen-trato-al-cliente-la-clave-de-una-empresa/>
- [25] Prieto Sierra, C. (2014). *Emprendimiento*. Pearson Educación
- [26] Espinoza, M. & Moreno, Y. (2018). *Marketing estratégico*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. <https://repositorio.unan.edu.ni/9631/1/16923.pdf>

## Evaluación probabilística y económica de dos diseños de mezclas de hormigón ligero en la resistencia mecánica de mampuestos aliviados con fibras de PET triturado

Kevin R. Bernal Jiménez\*<sup>1</sup>, Wladimir A. Calvache<sup>1</sup>, Jorge L. Santamaría<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador

\*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: [kribernal@uce.edu.ec](mailto:krbernal@uce.edu.ec)

### Probabilistic and economic evaluation of two designs of lightweight concrete mixes on the mechanical strength of masonry units relieved with shredded PET fibers

#### Abstract

The objective of this article is to evaluate two dosing methodologies to manufacture hollow blocks with shredded PET recycled material in compliance with the current NTE INEN 3066 standard. The evaluation was carried out by means of statistical and financial analysis to identify the most optimal mix design in terms of mechanical properties and manufacturing costs, respectively. The methodology consists of proportioning by weight, replacing 50 % of the fine material (gravel) with plastic material. The two mix designs used were ACI 211.2 (called mix 1) and a modification of this American standard adapted to the specific properties of the materials available in Ecuador (called mix 2). The strength was evaluated by subjecting a batch of 20 masonry blocks to simple compression with the aid of the universal machine; in addition, from the results obtained for each batch, the quality control was determined based on a statistical analysis of Gaussian bell distribution. The unit cost was analyzed empirically based on the existing yield during each of the block manufacturing phases. With the results obtained, a correlation was observed between the resistance to simple compression together with the yield and the unit production cost of the block; determining mix 2 as the most optimal by reaching an average resistance of 3.60 MPa with a lower yield of 0.014 and a lower cost per block of 0.57 cents. This shows that the second methodology is the best option to produce type C blocks complying with the criteria of the Ecuadorian standard NTE INEN 3066 but considering a higher production cost than the handmade block. Finally, the results obtained are not only valuable for the optimization of the block manufacturing process, but also suggest new sustainable solutions in construction, highlighting the importance of regulatory standards and economic viability.

**Keywords:** Dosage, Polyethylene terephthalate, Student's t-test, Lightweight aggregates.

#### Resumen

El presente artículo tiene como objetivo evaluar dos metodologías de dosificación para elaborar bloques de aliviado con material reciclado de envases PET triturados cumpliendo con la normativa vigente NTE INEN 3066. La evaluación se realizó por medio



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



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

Recibido /  
Received:  
08/11/2023

Aceptado /  
Accepted:  
25/03/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
13/05/2024





de análisis estadísticos y financieros en donde se identificó el diseño de mezcla más óptimo referente a sus propiedades mecánicas, como costos de fabricación respectivamente. La metodología consistió en dosificar al peso, reemplazando el material fino (cascajo) en un 50 % por el material plástico. Los dos diseños de mezclas utilizados fueron la ACI 211.2 (denominada mezcla 1) y una modificación de esta norma americana adaptada a las propiedades específicas de los materiales disponibles en Ecuador (denominada mezcla 2). La resistencia se evaluó al someter una tanda de 20 mampuestos a compresión simple con la ayuda de la máquina universal; además, de los resultados obtenidos de cada tanda, se determinó el control de calidad a partir de un análisis estadístico de distribución de campana de Gauss. El costo unitario se analizó empíricamente a partir del rendimiento existente durante cada una de las fases de fabricación del bloque. Con los resultados obtenidos se observó una correlación entre la resistencia a compresión simple junto al rendimiento y el costo de producción unitario del bloque; determinando la mezcla 2 como la más óptima al alcanzar una resistencia promedio de 3,60 MPa con un menor rendimiento de 0,014 y un menor costo por bloque de 0,57 centavos. Esto demuestra que la segunda metodología resulta la mejor opción para elaborar bloques tipo C cumpliendo con los criterios de la norma ecuatoriana NTE INEN 3066, pero considerando un costo de producción superior al bloque artesanal. Finalmente, los resultados obtenidos no solo son valiosos para la optimización del proceso de fabricación de bloques, sino que sugieren nuevas soluciones sostenibles en la construcción y destacan la importancia de los estándares normativos y la viabilidad económica.

**Palabras clave:** dosificación, tereftalato de polietileno, prueba t de Student, agregados ligeros.

---

## INTRODUCCIÓN

La construcción es uno de los sectores que más afecta al medio ambiente debido a la explotación de recursos no renovables y a la generación de residuos. Según el World Watch Institute, el sector de la construcción consume 40 % de materiales vírgenes, los cuales se destinan para la fabricación del cemento o se usan como árido para hormigones y morteros. La extracción de estos recursos requiere enormes cantidades de energía que producen emisiones de carbono y afectan negativamente las condiciones ambientales y climatológicas [1,2]. A continuación, se describe detalladamente cada uno de los factores que influyen en esta problemática.

En primer lugar, se identifican los procesos de combustión necesarios para la fabricación del clínker del cemento Portland en donde se realiza una mezcla homogénea en caliente de varios materiales pétreos como: caliza, arcilla, arena y compuestos de hierro, hasta llegar a la temperatura de sinterización [3]. La problemática es la generación de altas emisiones de CO<sub>2</sub> que provocan un incremento en la huella de carbono. Un informe científico realizado por Robbie Andrew, perteneciente al Centro CICERO para la Investigación Climática Internacional y al Proyecto Global de Carbono de Noruega, concluye que para el año 2021 esta cifra se duplicó, aumentando a 2900 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> y representando más del 7 % de las emisiones de todo el planeta [4].



El segundo problema está relacionado con la explotación de material pétreo a cielo abierto; del cual se extrae alrededor de 9000 millones de toneladas anuales (aproximadamente 18 kilos diarios por cada habitante). Las consecuencias de este tipo de prácticas aparecen cuando no existe un sistema adecuado de regularización y gestión que evite la sobreexplotación de áridos causando variaciones en los niveles freáticos, riesgos de inundación, probabilidad de sequías, así como impactos en el clima y la biodiversidad [2,5,6].

Acorde a estos dos problemas señalados, se hace evidente que los recursos pétreos se están agotando, lo que resulta en un aumento de su precio en el mercado. Este incremento se atribuye a la demanda de energía que se ocupa para la extracción, producción y transporte de los áridos. Por lo tanto, las empresas de explotación de canteras deben subir el precio, para así obtener la rentabilidad económica suficiente. Considerando esta problemática, se buscan materiales que, además de ser económicamente viables, ofrezcan una alternativa ambiental sostenible, teniendo como práctica común el sustituir parcial o totalmente, agregados convencionales por materiales reciclables en la fabricación de concreto o mampuestos, con la condición de priorizar el cumplimiento de las respectivas normativas técnicas.

Existen trabajos de investigación que abordan las temáticas de materiales de construcción sostenible y reciclable en la fabricación de hormigones. Por mencionar algunos ejemplos: una tesis desarrollada por Aguilar Lara acerca del reemplazo de cemento por cenizas provenientes de la incineración del cuesco de palma africana para elaboración de hormigones livianos [7], una investigación por Vivas Villareal sobre el uso de ceniza de madera como sustituto parcial de agregado fino para el diseño de hormigones ligeros [8] o la publicación de un artículo en línea donde se detalla que la Universidad Politécnica de Valencia ha desarrollado un hormigón celular catalogado como el más ecológico del mundo al combinar cenizas de cáscara de arroz, papel de aluminio y residuos procedentes de la fabricación de hierro en altos hornos [9]. Todas estas propuestas describen ideas que ayudan a mitigar la contaminación ambiental al emplear materiales reciclados; sin embargo, la mayor parte de estos productos se derivan de desechos industriales que incluso no se obtienen en grandes proporciones. Por lo tanto, se pueden buscar otras alternativas con mayor disponibilidad en el entorno; un claro ejemplo es el plástico que se tira a la basura y permanece en los vertederos.

La contaminación plástica es una problemática que ha incrementado su consumo desde el inicio de la pandemia del Covid-19. Durante dicha temporada alarmante hubo un aumento de desechos plásticos en los contenedores de basura. Una publicación en línea informó que el porcentaje de material plástico desechado en los rellenos sanitarios era del 12,45 % de toda la basura recolectada en la ciudad de Quito; pero con el paso de la pandemia, la ciudad produjo 600 toneladas adicionales de basura a las 2200 toneladas diarias, causando saturación de desechos en los rellenos sanitarios junto a problemas de lixiviados [10].

El uso desmedido del plástico y no contar con una regulación en los contenedores de basura y rellenos sanitarios causan mayor contaminación ambiental. Entre las soluciones más comunes a esta problemática se encuentran: elaborar planes de reciclaje, fabricar envases biodegradables o cobrar una tarifa por el uso de fundas plásticas en el



supermercado. Sin embargo, se requerirá tiempo y dinero para que estas medidas sean aprobadas; por ende, esta puede ser una oportunidad para investigar la adicción del material plástico PET triturado en la fabricación de mampuestos alivianados.

El objetivo de este manuscrito es realizar una evaluación probabilística de los ensayos de resistencia a compresión simple de bloques elaborados con fibras de PET triturado por dos métodos de diseño de mezcla. Asimismo, se compara la factibilidad económica de los bloques de aliviamiento hechos de manera artesanal con los de PET triturado mediante un análisis de precios unitarios y el cálculo empírico del rendimiento de cada una de las fases que intervienen durante la fabricación. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se concluye si los mampuestos con fibras de PET triturado son una alternativa efectiva para la construcción sostenible y una solución para la contaminación plástica.

## METODOLOGÍA

El presente artículo se basa en la comparación de dos técnicas empleadas para la elaboración de hormigón aligerado: la normativa ACI 211.2 y una adaptación de esta norma americana, elaborada por Santacruz y Velastegui, la cual considera las propiedades específicas de los materiales disponibles en Ecuador. Adicionalmente, se explora el uso de fibras de plástico PET triturado como parte del enfoque hacia la construcción sostenible mediante el uso de materiales reciclables. Por último, la investigación adopta un enfoque cuantitativo al evaluar y comparar la resistencia mecánica y los costos de los bloques fabricados por estas dos técnicas.

Debido a la influencia que posee el estudio estadístico se consideró un número significativo de 20 bloques por cada dosificación, siendo este tamaño de muestra el que permite tener un análisis con el menor margen de error e incrementando el nivel de confianza de los futuros resultados obtenidos [11].

Una vez finalizados los ensayos de resistencia a compresión simple, se determinó la media, la desviación estándar y, posteriormente, la gráfica de distribución normal con estos últimos datos. La finalidad de la gráfica es hallar el porcentaje de confianza de la mínima resistencia a compresión simple esperada al fabricar los bloques alivianados por los dos métodos de diseño de mezclas propuestos y, a su vez, que cumplan con las especificaciones de la normativa NTE INEN 3066.

Para la fabricación de los bloques se empleó cemento Portland puzolánico tipo IP de altas resistencias iniciales, cascajo (agregado fino procedente de la cantera de la Mitad del Mundo), chasqui (agregado grueso procedente de las minas de Chasqui-Cotopaxi) y las fibras de plástico PET triturado y lavado (donación realizada por parte de la empresa ENKADOR).

Adicionalmente, cabe resaltar que los ensayos de caracterización de los materiales empleados fueron realizados en el laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Central del Ecuador. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Propiedades físicas del material cementante

Parámetros	Cemento Portland tipo IP
Consistencia normal (% contenido de agua) [12]	29,5 %
T. fraguado inicial (min) [13]	170 min
T. fraguado final (min) [13]	227 min
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) [14]	2,96 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 2.** Propiedades físicas de los agregados

Ensayo característico	Parámetros	Chasqui	Cascajo	PET	Cascajo + PET
<b>Granulometría</b> [15]	Módulo de finura	3,88	3,13	3,27	2,71 <sup>1</sup>
	Tamaño nominal	#4 (4,76mm)	-	-	-
<b>Densidad y capacidad de absorción</b> [16, 17]	Densidad suelta (g/cm <sup>3</sup> )	0,855 g/cm <sup>3</sup>	1,124 g/cm <sup>3</sup>	0,505 g/cm <sup>3</sup>	0,739 g/cm <sup>3</sup>
	Densidad compactada (g/cm <sup>3</sup> )	0,896 g/cm <sup>3</sup>	1,329 g/cm <sup>3</sup>	0,562 g/cm <sup>3</sup>	0,831 g/cm <sup>3</sup>
	Densidad SSS (g/cm <sup>3</sup> )	1,91 g/cm <sup>3</sup>	2,22 g/cm <sup>3</sup>	-	2,23 g/cm <sup>3</sup>
	Capacidad de absorción (%)	16,6 %	8,25 %	-	4,21 %
<b>Colorimetría</b> [18]	Gardner	-	14	-	11
	Escala de color placa orgánica	-	4	-	3
<b>Densidad máxima y óptima</b>	Densidad aparente óptimo (% Grueso)	44 %	-	-	-
	Densidad aparente óptimo (% Fino)	-	-	-	56 %

<sup>1</sup> La mezcla de Cascajo + PET, al ser empleada como agregado fino, se proyectó que el material tuviera una granulometría tal que su curva se encontrara dentro de los límites granulométricos descritos en la norma NTC 174 [19], caso que no cumplían los materiales por separado, por lo cual se tamizó ambos materiales (a partir del uso del tamiz #4), obteniendo un agregado con módulo de finura de 2,71.

## Proceso para el diseño de mezclas de hormigón:

### Estudios de las especificaciones de la obra

Para el presente caso se considera las especificaciones dadas en la norma NTE INEN 3066 [20] para un bloque tipo C, teniendo que realizar los diseños para hormigón ligero.

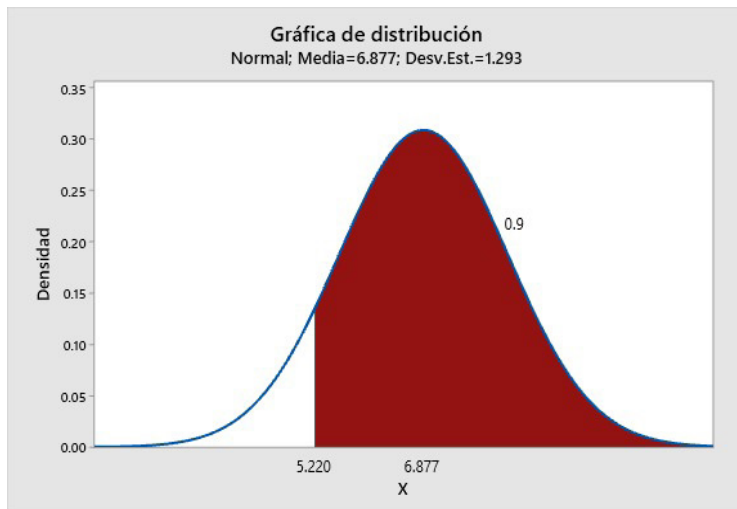
### Definición de la resistencia promedio requerida

Al contar con la ayuda de la empresa Materiales de Construcción se procedió a tomar una muestra de 10 bloques y se llevó un registro de los ensayos de resistencia, que se visualiza en la tabla 3 para el posterior cálculo de la desviación estándar [21,22].

**Tabla 3.** Resultados del ensayo de resistencia a compresión

Bloque #	Esfuerzo neto (MPa)
1	8,84
2	5,26
3	8,13
4	5,06
5	6,88
6	6,07
7	8,32
8	6,32
9	7,52
10	6,37
<b>Promedio</b>	6,88
<b>Desviación estándar</b>	1,29

Con los resultados del ensayo se elaboró una campana de Gauss, tal como se muestra en la figura 1. En ella se identifica una desviación estándar de 1,29 y una dispersión de 5,220 con respecto a la media, pero con un porcentaje de confianza del 90 %. A partir de este análisis, se determinó que la resistencia promedio requerida a la compresión es  $f'_{cr} = f'_c + 1,8$  (MPa); siendo para la resistencia mínima de los bloques propuestos en este trabajo un  $f'_{cr} = 3.5$  MPa [20,21].



**Figura 1.** Distribución normal bloques de hormigón



La mayoría de los fabricantes de bloques no cumplen con el curado óptimo a los 28 días, de hecho, el mampuesto se encuentra disponible en el mercado después de 8 días de fabricación [23]. Conociendo esta realidad, los ensayos se realizaron a los 7 días; considerando que el 80 % de la resistencia promedio debe cumplir con lo especificado en la norma NTE INEN 3066; por lo tanto, el  $f'_{cr}$  a considerar es de 4,375 MPa [20,24].

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que se va a utilizar material PET en la mezcla (específicamente un reemplazo del 50 % al agregado fino), reduciendo su resistencia a la compresión entre un 50 % a 65 %. Esto último es considerado a partir de las conclusiones y recomendaciones halladas en investigaciones referentes al estudio del material PET en hormigones [25,26,27,28,29,30,31], por tal motivo se estableció un  $f'_{cr} = 8,75$  MPa.

## Dosificación 1 – Método ACI 211.2

### Estimación del revenimiento

Se emplea la tabla 4 donde se muestran valores recomendados para cada tipo de elementos estructurales [21]. Para los bloques a elaborar se considera un revenimiento de 25 mm.

**Tabla 4.** Revenimiento recomendado para diferentes elementos estructurales

Revenimiento (mm)		
Elemento estructural	Máximo	Mínimo
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Sistema de piso (losas)	75	25

Adaptado de American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. ACI 211, 2-98.

### Estimación del agua de la mezcla y el contenido de aire

La cantidad de agua por unidad de volumen para alcanzar el revenimiento seleccionado depende del tamaño máximo del agregado grueso, el contenido de aire y los aditivos químicos que se emplean [21]. La tabla 5 presenta una primera estimación del agua a emplear.

**Tabla 5.** Agua de mezcla para diferentes revenimientos y tamaño máximo de agregado

Tamaño máximo de agregado	3/8"	1/2"	3/4"
<b>Concreto con aire incluido</b>			
	<b>Agua en kg/m<sup>3</sup> de hormigón</b>		
Revenimiento de 25 mm a 50 mm	181	175	166
Revenimiento de 75 mm a 100 mm	202	193	181
Revenimiento de 125 mm a 150 mm	211	199	187
	<b>Contenido total de aire recomendado para diferentes niveles de exposiciones en %</b>		
Exposición ligera	4,5	4	4
Exposición moderada	6	5,5	5
Exposición extrema	7,5	7	6
<b>Concreto sin aire incluido</b>			
	<b>Agua en kg/m<sup>3</sup> de hormigón</b>		
Revenimiento de 25 mm a 50 mm	208	199	187
Revenimiento de 75 mm a 100 mm	228	217	202
Revenimiento de 125 mm a 150 mm	237	222	208
	<b>Contenido aproximado de aire atrapado en el hormigón sin aire incluido en %</b>		
	3	2,5	2

Adaptado de American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lighteighth Concrete. ACI 211, 2-98.

Empleando el criterio de hormigón sin aire incluido, conociendo el tamaño máximo del agregado y con el revenimiento seleccionado, se determina que el agua necesaria es de 199 kg por cada metro cúbico de hormigón.

### Selección de la relación aproximada de agua cemento

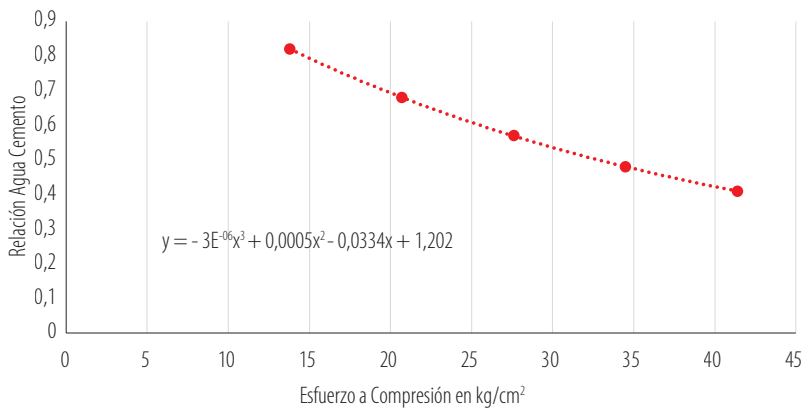
Para la relación agua-cemento (w/c) no se considera únicamente la resistencia requerida; sino también interviene la durabilidad, las propiedades finales deseadas y la calidad de los materiales a emplear. Se han observado casos en los que se emplea la misma relación w/c, pero se obtienen distintas resistencias. Por lo tanto, es fundamental destacar el desarrollo de una relación específica entre la resistencia y el w/c para cada material que se pueda emplear [21,22,32]. En el contexto de esta investigación, se han tomado en cuenta los valores mostrados en la tabla 6.

**Tabla 6.** Relación entre w/c y resistencia a compresión del concreto

Resistencia a compresión a 28 días MPa	Relación aproximada agua – cemento, por masa	
	Hormigón sin aire incluido	Hormigón con aire incluido
41,4	0,41	---
34,5	0,48	0,4
27,6	0,57	0,48
20,7	0,68	0,59
13,8	0,82	0,74

Adaptado de American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. ACI 211, 2-98.

Considerando que la resistencia a los 28 días debe ser 8,75 MPa, se elabora la figura 2 con los valores recomendados de la tabla 6, de la cual resulta la ecuación que representa el comportamiento de la recta; obteniendo de esta forma la relación w/c de 0,946.



**Figura 2.** Relación de w/c en función del esfuerzo de compresión

### Cálculo de la cantidad de cemento

Una vez determinada la cantidad de agua y la relación w/c, se determina la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón, aplicando la ecuación 1:





$$\text{Cemento } \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Cantidad de agua } \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{w/c \text{ (para } f'_{cr})} \quad (1)$$

Tras obtener la cantidad necesaria de cemento para los bloques aligerados, el resultado es 210,355 kg/m<sup>3</sup>.

### Determinación del contenido del agregado grueso ligero

Los agregados con el mismo tamaño máximo nominal y graduación —además de un adecuado volumen de agregado grueso— producen un hormigón de buena manejabilidad. En la tabla 7 se proporciona una estimación de dicho volumen, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino [21].

**Tabla 7.** Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto

Tamaño máximo del agregado grueso		Volumen del agregado grueso suelto en horno por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de arena			
Pulgada	mm	2,4	2,6	2,8	3
3/8	9,5	0,58	0,56	0,54	0,52
1/2	12,7	0,67	0,65	0,63	0,61
3/4	19	0,74	0,72	0,7	0,68

Adaptado de American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweigh Concrete. ACI 211, 2-98.

Teniendo en cuenta el tamaño máximo del agregado grueso (12,7 mm) y el módulo de finura (2,71), se obtiene un volumen de agregado suelto de 0,639 m<sup>3</sup> por unidad de volumen de hormigón, valor interpolado de los datos de la tabla 7. Por otro lado, al conocer que la densidad suelta del agregado grueso es de 855 kg/m<sup>3</sup>, se obtiene el valor de 546,345 kg por metro cúbico de hormigón.

### Determinación del contenido del agregado fino

Se exponen dos posibles procesos que permiten determinar el contenido del agregado fino.

El primero es la experiencia que se tiene con el tipo de mezcla, considerando la masa volumétrica del hormigón ligero con suficiente aproximación, con el cual se determinará la masa por diferencia [21].

El segundo proceso se usa cuando no se tiene la información necesaria de la mezcla a elaborar, optando por el empleo de la tabla 8 [21], en la que se entrega una estimación de la masa volumétrica del hormigón, considerando el factor de gravedad específica del agregado grueso y el contenido de aire.

**Tabla 8.** Primera estimación de la masa volumétrica del hormigón ligero fresco compuesto por agregado ligero y arena de masa normal

Factor de gravedad específica	Primera estimación de la masa volumétrica del hormigón ligero, kg/m <sup>3</sup>		
	Hormigón con aire incluido		
	4 %	6 %	8 %
<b>1</b>	1596	1561	1519
<b>1,2</b>	1680	1644	1608
<b>1,4</b>	1769	1727	1691
<b>1,6</b>	1852	1810	1775
<b>1,8</b>	1935	1899	1858
<b>2</b>	2024	1982	1941

Adaptado de American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. *ACI 211*, 2-98.

Tras conocer el peso específico del agregado grueso (1,91) y el porcentaje de aire incluido en el hormigón (4 %), tenemos una masa volumétrica de 1983,95 kg/m<sup>3</sup>, valor interpolado de los datos de la tabla 8. Finalmente, con el valor de la masa volumétrica de los materiales se obtiene por diferencia un valor de 1028.250 kg de agregado fino por unidad de volumen.

### Ajuste en las proporciones de la mezcla

En este punto se realiza un ajuste a la mezcla por humedad y absorción de los agregados, obteniendo una primera estimación de las cantidades a emplear como se indica en la tabla 9.

### Dosificación del hormigón ligero para la primera tanda de bloques

**Tabla 9.** Cantidades por metro cúbico de hormigón ligero estructural (mezcla 1)

Material	Peso (kg)	Dosificación
<b>Agua</b>	199	0,946
<b>Cemento</b>	210,355	1
<b>Agregado fino (cascajo + PET)</b>	1028,250	4,888
<b>Agregado grueso (chasqui)</b>	546,345	2,597

### Dosificación 2 – método ACI 211.2 modificado

El presente método volumétrico se aplica cuando ambos agregados son ligeros o cuando se emplean agregados finos de peso normal.



## Determinación del contenido de agregado fino

El volumen total de agregados requerido es definido como la sumatoria de todos los volúmenes no combinados; en recientes estudios se define un volumen total como aquel que se encuentra entre 1,04 y 1,26 metros cúbicos por cada metro cúbico de hormigón [24,32]. De esta cantidad, aproximadamente entre el 40 % y 60 % del volumen suelto total corresponde al agregado fino.

Para esta investigación, se ha establecido un volumen recomendado de 1,26 m<sup>3</sup>. Del total, se determinó que el 56 % corresponde al agregado fino, porcentaje obtenido a partir de los ensayos de densidad máxima y óptima. Por lo tanto, el volumen calculado es de 0,706 m<sup>3</sup>. Adicionalmente, al conocer la densidad suelta del agregado fino (0,739 g/cm<sup>3</sup>), se determinó la cantidad precisa de material: 521,44 kg por cada metro cúbico de hormigón.

## Determinación del contenido de cemento

En el trabajo de titulación de Santacruz y Velastegui se adapta el cálculo para la determinación del cemento establecido por la normativa ACI 211.2, teniendo en cuenta las condiciones y el estado de los materiales que comúnmente se emplean para los bloques de aliviamiento. De esta investigación se obtiene la curva para la resistencia del bloque en función del contenido de cemento, de la cual se determina una función final, resultando una ecuación polinómica de segundo grado (Ec. 2) la cual se adapta a los datos y a su vez permite determinar la cantidad de cemento para la mezcla. [24]

$$\text{Contenido de cemento (kg/m}^3\text{)} = 0.0159 * x^2 - 0.3413 * x + 29.689 \quad (2)$$

Donde:

x: es la resistencia a compresión del bloque que se desea fabricar (kg/cm<sup>2</sup>)

Por lo tanto, considerando que la resistencia objetivo del mampuesto debe ser de 8,75 MPa, se obtiene un valor de contenido de cemento de 125,88 kg por metro cúbico de hormigón.

## Determinación del agua para la mezcla

Calculada la cantidad de cemento y la relación de w/c obtenida del método mezcla 1 (0,946), se determina la cantidad de agua por metro cúbico de hormigón, consiguiendo dicho resultado de la ecuación 3.

$$\text{Cantidad de agua (kg/m}^3\text{)} = \text{Cemento (kg/m}^3\text{)} * w/c \text{ (para } f'cr \text{)} \quad (3)$$

Al aplicar la ecuación se obtuvo el agua necesaria para la elaboración de los bloques, teniendo como resultado 119,085 kg/m<sup>3</sup>.

## Determinación del contenido de agregado grueso ligero

A partir del volumen total para la mezcla ( $1,26 \text{ m}^3$ ) y del volumen suelto del agregado fino; del cemento y del agua a emplear; se realiza una operación algebraica, que da por diferencia el volumen suelto del agregado grueso ( $0,392 \text{ m}^3$ ). Por último, con el conocimiento de la densidad suelta, se determinó que la cantidad a emplear de agregado grueso ligero es de  $335,53 \text{ kg/m}^3$ .

## Ajuste en las proporciones de la mezcla

Al igual que el método anterior, se ajusta la mezcla por humedad y absorción, realizando una corrección de agua a emplear y obteniendo una primera estimación de las cantidades a utilizar como se visualiza en la tabla 10.

## Dosificación del hormigón ligero para la segunda tanda de bloques

**Tabla 10.** Cantidades por metro cúbico de hormigón ligero estructural (mezcla 2)

Material	Peso (kg)	Dosificación
Agua	119,09	0,946
Cemento	125,88	1
Agregado fino (cascajo + PET)	335,53	4,14
Agregado grueso (chasqui)	521,44	2,67

## Proceso de fabricación del bloque hueco

La fabricación de los mampuestos se realiza preparando la mezcla al volumen [22,24,32] y empleando carretillas o baldes en el proceso. Esta forma de dosificar no genera un desempeño óptimo a la hora de la mezcla, por ende, para el presente estudio se realizó la dosificación al peso, lo que permite un mayor control de calidad, pero genera un incremento en el rendimiento necesario para la producción.

En la etapa de mezclado se dejó a los agregados y a una parte del agua por aproximadamente 3 minutos. Al obtener una mezcla homogénea se procedió con la inclusión del cemento con el agua restante y la mezcla se prolongó por 3 minutos más.

Con la primera dosificación se observó una falta de cohesión. Para evitar esta segregación, se incluyó polvo azul, material que no ayuda en la adquisición de resistencia, pero sí proporciona cohesión a la mezcla [24,29,32]. Por último, la cantidad empleada de este material fue del 50 % del contenido de agregado fino empleado (siendo para la mezcla 1 y la mezcla 2 de 48,93 kg y 44,67 kg respectivamente).

En la primera tanda se dejó los materiales en la mezcladora por 12 minutos; en la segunda, conociendo el comportamiento de los materiales, se redujo el tiempo a 6 minutos. En ambos casos se consiguió una pasta trabajable y de buena textura.



Finalmente, para el moldeo de los bloques se empleó la maquinaria de vibro compactación en el cual, para ambos casos, se requirió de 90 segundos para el proceso de llenado.

## RESULTADOS

### Ensayo de resistencia a compresión simple

Cumpliendo con los parámetros que establece la normativa NTE INEN 3066 para los bloques de alivianamiento tipo C referente a las propiedades físicas como: densidad, porcentaje de sólidos y contenido de humedad; se procede con el ensayo de resistencia a compresión simple detallado en el anexo E de la norma.

En la tabla 11 se comparan los resultados de carga máxima y resistencia a compresión simple obtenidos de cada tanda de bloques.

**Tabla 11.** Resistencia neta bloques mezcla 1 y mezcla 2

Área neta promedio = 28711,67 mm <sup>2</sup>			Área neta promedio = 29351,67 mm <sup>2</sup>		
Dosificación 1 – mezcla 1	Carga (kgf)	Resistencia neta (MPa)	Dosificación 2 – mezcla 2	Carga (kgf)	Resistencia neta (MPa)
<b>1 D1</b>	11047,00	3,77	<b>1 D2</b>	12322,00	4,12
<b>2 D1</b>	8803,00	3,01	<b>2 D2</b>	8325,00	2,78
<b>3 D1</b>	9101,00	3,11	<b>3 D2</b>	11325,00	3,78
<b>4 D1</b>	11434,00	3,91	<b>4 D2</b>	11260,00	3,76
<b>5 D1</b>	9734,00	3,32	<b>5 D2</b>	9935,00	3,32
<b>6 D1</b>	11530,00	3,94	<b>6 D2</b>	8491,00	2,84
<b>7 D1</b>	9174,00	3,13	<b>7 D2</b>	11677,00	3,90
<b>8 D1</b>	9382,00	3,20	<b>8 D2</b>	13957,00	4,66
<b>9 D1</b>	9247,00	3,16	<b>9 D2</b>	9475,00	3,17
<b>10 D1</b>	8344,00	2,85	<b>10 D2</b>	9900,00	3,31
<b>11 D1</b>	8317,00	2,84	<b>11 D2</b>	12326,00	4,12
<b>12 D1</b>	11561,00	3,95	<b>12 D2</b>	7950,00	2,66
<b>13 D1</b>	11631,00	3,97	<b>13 D2</b>	10383,00	3,47
<b>14 D1</b>	9317,00	3,18	<b>14 D2</b>	11654,00	3,89
<b>15 D1</b>	10460,00	3,57	<b>15 D2</b>	11418,00	3,81
<b>16 D1</b>	10881,00	3,72	<b>16 D2</b>	9452,00	3,16
<b>17 D1</b>	9016,00	3,08	<b>17 D2</b>	10638,00	3,55
<b>18 D1</b>	9085,00	3,10	<b>18 D2</b>	10487,00	3,50
<b>19 D1</b>	8626,00	2,95	<b>19 D2</b>	11144,00	3,72



Área neta promedio = 28711,67 mm <sup>2</sup>			Área neta promedio = 29351,67 mm <sup>2</sup>		
Dosificación 1 – mezcla 1	Carga (kgf)	Resistencia neta (MPa)	Dosificación 2 – mezcla 2	Carga (kgf)	Resistencia neta (MPa)
<b>20 D1</b>	9240,00	3,16	<b>20 D2</b>	13165,00	4,40
<b>Resistencia promedio (MPa)</b>		3,35	<b>Resistencia promedio (MPa)</b>		3,60

De la tabla se evidencia que las resistencias de los bloques presentaron una disminución aproximada del 50 % del diseño calculado para ambas metodologías.

Al analizar la resistencia promedio, se detalla que los bloques de la mezcla 2 presentan un aumento del 7,46 % en comparación a los bloques de la mezcla 1. Esto se debe a que la segunda metodología toma en consideración las características de los materiales manejados en el Ecuador [24,32]. Finalmente, los resultados se detallan en la tabla 12.

**Tabla 12.** Cantidad de materiales para la elaboración de las tandas de la mezcla 1 y la mezcla 2

Material	Metodología empleada	
	Mezcla PET1	Mezcla PET2
Cemento	20,02 kg	21,57 kg
Agua	18,94 kg	20,40 kg
Cascajo + PET	97,85 kg	89,34 kg
Chasqui	51,99 kg	57,48 kg
Polvo azul	48,93 kg	44,67 kg

### Análisis de Distribución normal

El análisis probabilístico de Distribución normal o campana de Gauss de la resistencia neta a compresión simple, permite identificar el control de calidad existente en el diseño de mezcla partiendo de la media y de la desviación estándar; esto con el fin de que cada lote elaborado tenga un 90 % de probabilidad de superar la resistencia establecida en la normativa NTE INEN 3066. En las figuras 3 y 4 se detalla el análisis probabilístico para los bloques de la mezcla 1 y 2.

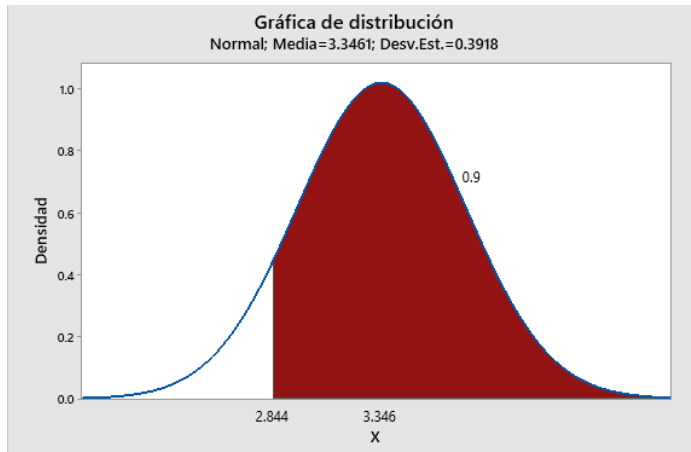


Figura 3. Distribución normal de la mezcla 1

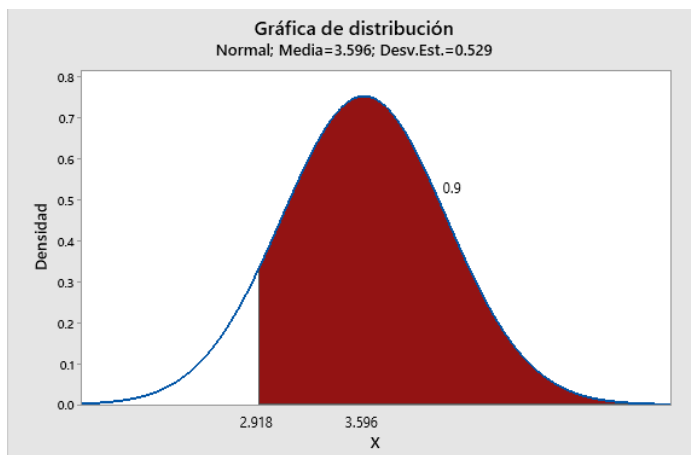


Figura 4. Distribución normal de la mezcla 2

Con las figuras 3 y 4 (obtenidas a partir del programa Minitab) se garantiza que los bloques elaborados con ambas dosificaciones (mezcla 1 y mezcla 2) tienen un 90 % de probabilidad de superar las resistencias de 2,844 MPa y 2,918 MPa respectivamente. Considerando que los resultados de ambas metodologías cumplen con las condiciones especificadas en la normativa, es necesario realizar un análisis estadístico denominado prueba t de student.

### Prueba t de student

Este análisis, del tipo estadística deductiva, permite evaluar la media de uno o dos grupos de muestras a partir de una prueba de hipótesis. La primera es la hipótesis que se desea probar y en estadística se llama hipótesis nula (denotado con  $H_0$ ), y la segunda es cuando se rechaza la  $H_0$  lo que conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa (denotado con  $H_1$ ). Finalmente, se indica que la hipótesis alternativa  $H_1$  por lo general



responde a la pregunta de la teoría que se plantea probar mientras que la hipótesis nula  $H_0$  se opone o anula la hipótesis alternativa [33].

Con esta prueba se evalúan las muestras de resistencia neta a compresión simple de los bloques para determinar si las medias de la población de dos grupos distintos son o no iguales. Es decir, al analizar las diferencias se concluye cuál de las dos metodologías es ideal para la fabricación de bloques de alivianamiento con PET. Para ello se recurrió al *software* Minitab y sus resultados se muestran en las tablas 13, 14 y 15.

**Tabla 13.** Estadístico descriptivo para la prueba t de student de dos muestras

Muestra	N	Media	Desv. Est.	Error estándar de la media
Esf. Neto-D2	20	3,596	0,529	0,12
Esf. Neto-D1	20	3,346	0,392	0,088

**Tabla 14.** Estimación de la diferencia de la prueba t de student de 2 muestras

Diferencia	IC de 95 % para la diferencia
0,250	(-0,049; 0,549)

**Tabla 15.** Análisis de la hipótesis

Hipótesis nula	Hipótesis alterna	Valor T	GL	Valor p
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$	1,70	38	0,049

Entre el valor de p (0,049) en el análisis de hipótesis y el valor del nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ), se obtiene que  $p < \alpha$ ; por lo tanto, la diferencia entre las medias es estrictamente significativa y se rechaza la hipótesis nula. En otras palabras, existe evidencia a partir del IC (índice de confianza) del 95 % para afirmar que existe una diferencia entre los promedios de la resistencia neta a compresión simple, señalando que los mampuestos de la mezcla 2 tienen una probabilidad más alta de cumplir con la resistencia establecida en la norma.

A nivel estadístico se tiene claro cuál es la metodología más óptima a emplear; pero, en el mercado de la producción y distribución del bloque artesanal se da un mayor enfoque a los costos de material y de producción [22,23]. Entonces, se tiene que realizar un análisis de presupuesto con el cual se determinará la metodología que presente un bajo costo para su elaboración.

## Análisis de costo directo de los materiales

A continuación, se procede a comparar la mezcla 1 y la mezcla 2 a partir del análisis del costo directo total de la cantidad de materiales que se requieren para fabricar el mampuesto. En la tabla 16 se puede observar el costo total de los materiales empleados para una tanda de 20 bloques tanto para la mezcla 1 como la mezcla 2.



**Tabla 16.** Subtotal materiales (20 bloques)

Metodología (saco)		Cemento (m <sup>3</sup> )	Agua (m <sup>3</sup> )	Chasqui (m <sup>3</sup> )	Cascajo (kg)	PET (m <sup>3</sup> )	Polvo azul	Subtotal materiales (dólares)
<b>Mezcla 1</b>	Cantidad	0,40	0,019	0,0608	0,044	49,00	0,044	6,01
	Precio unitario	8,00	0,14	9,00	10,00	0,03	8,00	
	Total (\$)	3,20	0,0027	0,55	0,44	1,47	0,35	
<b>Mezcla 2</b>	Cantidad	0,4314	0,0204	0,0672	0,0398	44,67	0,0398	6,12
	Precio unitario	8,00	0,14	9,00	10,00	0,03	8,00	
	Total (\$)	3,45	0,0029	0,60	0,40	1,34	0,32	

Con estos resultados, se indica que la metodología de la mezcla 1 tiene mejores beneficios económicos, observando una reducción en costos de adquisición de 11 centavos para la elaboración de una tanda de 20 bloques. Además, se encuentra una mayor optimización en el material cementante junto a un mayor uso del material triturado PET, impulsando el uso de este último en mayor medida.

### Análisis de precio unitario – rendimiento

Se tiene conocimiento de que al emplear el material PET se puede observar una mezcla poco trabajable [29,34]; lo que hace necesario prolongar el tiempo en el proceso de mezclado y vibro compactado, como se evidencia en la tabla 17, esto para evitar la segregación logrando una mezcla cohesiva y trabajable.

**Tabla 17.** Rendimiento para los dos tipos de dosificaciones y mezcla artesanal

Fase	Mezcla 1	Mezcla 2	Artesanal
Mezclado (min)	12	6	3
Vaciado y vibro compactado (min)	9	9	3
Desmoldado y acoplo (min)	6	6	6
Tiempo total (min)	27	21	12
Tiempo total (horas)	0,45	0,35	0,2
# de bloques elaborados	25	25	27
R (horas/unidad)	0,018	0,014	0,007

En la tabla 17 se aprecia que los bloques artesanales requieren de menor tiempo para su elaboración comparado con los bloques elaborados con PET. Enfocando esta comparación a los rendimientos de la mezcla 1 y la mezcla 2, se evidencia que este valor es directamente proporcional a la cantidad de PET a emplear, requiriendo un mayor rendimiento para los bloques de la mezcla 1.



Este aumento de rendimiento implica un alza en los precios para la elaboración de los bloques, específicamente en los costos directos de la mano de obra y la maquinaria empleada. A continuación, en las tablas 18 y 19 se detalla el análisis de precio unitario para los bloques de la mezcla 1 y de la mezcla 2 respectivamente.

**Tabla 18.** Análisis de precio unitario (mezcla 1)

Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/hora	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A \times B$	R	$D=C \times R$
Peón (EO E2)	2,0	3,82	7,64	0,018	0,14
Albañil (EOD2)	1,0	3,87	3,87	0,018	0,070
Maestro mayor (EO C1)	0,1	4,29	0,43	0,018	0,008
<b>Subtotal (MO)</b>					0,21
Equipos					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A \times B$	R	$D=C \times R$
Herramienta menor (5 % MO)	-	-	-	-	0,011
Mezcladora de tambor (10 % MO)	-	-	-	-	0,021
Máquina de vibro-compactación (10 % MO)	-	-	-	-	0,021
<b>Subtotal (E)</b>					0,054
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Costo	
	A	B	$C=A \times B$		
Cemento gris	Saco	0,0200	8,00	0,16	
Agua	m3	0,00095	0,14	0,0001	
Chasqui	m3	0,0030	9,00	0,03	
Cascajo	m3	0,0022	10,00	0,02	
PET triturado y lavado	Kg	2,45	0,03	0,07	
Polvo azul	m3	0,0022	8,00	0,02	
<b>Subtotal (M)</b>					0,30
Transporte					
<b>Subtotal (T)</b>					0,00
Costo total directo (MO+E+M+T)					0,57
Costo indirecto				0,00 %	0,00
Utilidad				12,00 %	0,07
Costo total del rubro					0,64

**Tabla 19.** Análisis de precio unitario (mezcla 2)

<b>Mano de obra</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Jornal/hora</b>	<b>Costo hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C=AxB</b>	<b>R</b>	<b>D=CxR</b>
Peón (EO E2)	2,0	3,82	7,64	0,014	0,11
Albañil (EOD2)	1,0	3,87	3,87	0,014	0,05
Maestro mayor (EO C1)	0,1	4,29	0,43	0,014	0,01
<b>Subtotal (MO)</b>					0,17
<b>Equipos</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C=AxB</b>	<b>R</b>	<b>D=CxR</b>
Herramienta menor (5 % MO)	-	-	-	-	0,008
Mezcladora de tambor (10 % MO)	-	-	-	-	0,017
Máquina de vibro-compactación (10 % MO)	-	-	-	-	0,017
<b>Subtotal (E)</b>					0,042
<b>MATERIALES</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P. Unitario</b>	<b>Costo</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C=AxB</b>		
Cemento gris	Saco	0,0216	8,00	0,17	
Agua	m3	0,0010	0,14	0,0001	
Chasqui	m3	0,0034	9,00	0,03	
Cascajo	m3	0,0020	10,00	0,02	
PET triturado y lavado	kg	2,2335	0,03	0,07	
Polvo azul	m3	0,0020	8,00	0,02	
<b>Subtotal (M)</b>					0,31
<b>Transporte</b>					
Subtotal (T)					0,00
Costo total directo (MO+E+M+T)					0,51
Costo indirecto					0,00
Utilidad 12,00 %					0,06
Costo total del rubro					0,57



Considerando todos los aspectos para la elaboración de un bloque, se identifica que el precio que conlleva replicar el proceso de elaboración de mampuesto con la metodología de la mezcla 2 resulta más accesible, con un ahorro de 7 centavos con respecto a la metodología de la mezcla 1.

Por lo tanto, al tener un mayor porcentaje de probabilidad de superar la resistencia mínima para los bloques alivianados, junto con la optimización en rendimientos y por ende de costos de producción, la metodología de la mezcla 2 resultara más factible de introducir en el mercado con estos mampuestos ecológicos.

## CONCLUSIONES

La resistencia de los bloques alivianados para losas con PET es directamente proporcional a la cantidad de material cementante, e inversamente proporcional a la cantidad de material PET triturado. Por lo tanto, desde el punto de vista ambiental, es preferible diseñar los bloques con la mezcla 1 debido a que en este último se obtiene un menor consumo de material cementante y áridos durante su fabricación.

La metodología modificada de dosificación para hormigones ligeros [24,32], es decir, la metodología denominada mezcla 2, es idónea para el diseño de mezclas debido a que considera las características físicas de los agregados comúnmente empleados en el país. Además, garantiza que más del 90 % de los bloques huecos elaborados cumplan con la norma NTE INEN 3066 a la temprana edad de 7 días.

A partir de la resistencia media obtenida durante el ensayo a compresión en la tanda de 20 bloques tanto para la mezcla 1 como para la mezcla 2, se concluye que ambos diseños cumplen satisfactoriamente con la resistencia neta mínima de la normativa NTE INEN 3066 para bloques de aliviamiento tipo C teniendo resistencias promedio de 3,35 MPa y 3,60 MPa respectivamente.

Con la ayuda de la media y la desviación estándar obtenida en el ensayo de resistencia a compresión simple de los bloques diseñados con la mezcla 1 y la mezcla 2, se determina, mediante un análisis probabilístico de distribución normal, que ambos diseños tienen un 90 % de probabilidad de que los bloques superen la resistencia mínima de la norma, con valores de 2,844 MPa y 2,918 MPa respectivamente.

Teniendo en cuenta que las medias obtenidas de cada metodología cumplen con lo establecido en la norma NTE INEN 3066, se presenta la incertidumbre sobre cuál de los dos procesos proporcionará un mayor porcentaje de confianza. Es así que, con la prueba estadística conocida como t de student, se evidencia que existe una diferencia entre ambos procesos, por lo que mediante el análisis de distribución normal se observa un mayor índice de confianza, asegurando que los bloques producidos con la mezcla 2 tienen mayor probabilidad de alcanzar la resistencia de 2,918 MPa que los bloques de la mezcla 1.

El rendimiento, como factor empírico, mide el tiempo necesario para la elaboración de un bloque de aliviamiento y su cálculo es esencial para evaluar los costos directos relacionados con la mano de obra en cualquier análisis de precio unitario. En este



contexto, se observa que el rendimiento de la mezcla 1 es de 0,018, superando al de la mezcla 2, que es de 0,014. Estos resultados revelan que el tiempo de producción necesario para un mampuesto correspondiente a la mezcla 1 es mayor que el de la mezcla 2; influyendo directamente en el rendimiento y por ende en el precio del bloque. Por tal motivo, el bloque de mezcla 1 tiene un precio total de 0,64 centavos, siendo superior a los 0,57 centavos que cuesta el bloque de mezcla 2.

La proporción de materiales cementantes y áridos en la fabricación de mampuestos alivianados es directamente afectada por la metodología de dosificación empleada. Ambas están basadas en diseños empíricos, es decir, se ajustan a las características físico mecánicas de los materiales existentes en el entorno en donde se lleva a cabo el estudio. Aunque ambas metodologías cumplen con éxito la resistencia neta mínima a compresión simple acorde a la norma NTE INEN 3066, es fundamental evaluar cual es la más óptima según lo establecen las buenas prácticas de construcción sostenible. Esto implica considerar no solo la resistencia del mampuesto, sino también otros aspectos relevantes como el uso eficiente de recursos, la minimización de residuos y el impacto ambiental en general.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Jorge L. Santamaría Carrera realizó la conceptualización de la propuesta, gestión del proyecto y revisión del manuscrito.

Kevin R. Bernal Jiménez y Wladimir A. Calvache Cruz fueron responsables de la redacción y corrección del manuscrito, la toma de muestras y el análisis de datos.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés

## REFERENCIAS

- [1] Dobrowolska K. (2021). ¿Cómo afecta la construcción al medio ambiente? Archdesk. <https://archdesk.com/es/blog/como-afecta-la-construccion-al-medio-ambiente/#:~:text=En%20realidad%2C%20el%20sector%20de,que%20profundizar%20en%20los%20detalles>
- [2] Acosta, M. (2018). *Análisis del ciclo de vida de la producción de agregado grueso natural y combinación natural/reciclado en Barranquilla* [Tesis de grado, Universidad del Norte]. Repositorio Universidad del Norte. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8075>
- [3] Sanjúan, M. y Chinchón, S. (2014). Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014\\_Sanjuan\\_Chinchon\\_Cemento-Portland.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf)
- [4] Romero, S. (2022). *Las emisiones de CO2 del cemento se han duplicado en los últimos 20 años*. El Confidencial. [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/empresa/2022-07-26/efecto-invernadero-cambio-climatico-cemento\\_3463584/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/empresa/2022-07-26/efecto-invernadero-cambio-climatico-cemento_3463584/)
- [5] Noticias ONU. (2019). *La explotación insostenible de arena destruye ríos y mares*. Naciones Unidas. <https://news.un.org/es/story/2019/05/1455611>
- [6] Gan, V., Cheng, J. y Lo, I. (2016). Integrating life cycle assessment and multiobjective optimization for economical and environmentally sustainable supply of aggregate. *J. Clean. Prod.*, 113, 76–85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.092>
- [7] Aguilar, D. (2016). Sustitución del cemento con cenizas provenientes de la incineración del hueso de la palma africana para la elaboración del hormigón. Repositorio institucional Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/8896/1/T-UCE-0011-258.pdf>
- [8] Vivas, K. (2016). *Diseño de un hormigón liviano elaborado con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino*. Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24052/1/Tesis%201052%20-%20Vivas%20Villarreal%20Karol%20Natal%3%AD.pdf>
- [9] Agencia EFE. (2018). *Usan ceniza y restos de hierro para crear el hormigón más ecológico del mundo*. El País. <https://www.elpais.com.uy/vida-actual/usan-ceniza-y-restos-de-hierro-para-crear-el-hormigon-mas-ecologico-del-mundo>
- [10] Redacción Plan V. (2020). *Quito se asfixia en 6000 toneladas de fundas que nadie regula*. Plan V periodismo. <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/quito-se-asfixia-6000-toneladas-fundas-que-nadie-regula>
- [11] Ochoa, C. (2013). *¿Qué tamaño de muestra necesito?* NetQuest. <https://www.netquest.com/blog/que-tamano-de-muestra-necesito>
- [12] INEN 157. (2009). *Cemento hidráulico - Determinación de la consistencia normal: Método de Vicat*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. [https://www.academia.edu/32877743/INSTITUTO\\_ECUATORIANO\\_DE\\_NORMALIZACION\\_DE\\_CEMENTO\\_HIDRULICO\\_DETERMINACION\\_DE\\_LA\\_CONSISTENCIA\\_NORMAL\\_M\\_DE\\_VICAT](https://www.academia.edu/32877743/INSTITUTO_ECUATORIANO_DE_NORMALIZACION_DE_CEMENTO_HIDRULICO_DETERMINACION_DE_LA_CONSISTENCIA_NORMAL_M_DE_VICAT)
- [13] INEN 158. (2009). *Determinación de la consistencia normal: Método de Vicat*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://fr.scribd.com/document/255244157/Norma-inen-158>
- [14] INEN 156. (2009). *Cemento hidráulico - Determinación de la densidad: Método de Vicat*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://studylib.es/doc/5714656/nte-inen-0156--cemento-hidr%3A1ulico.-determinaci%3%B3n-de-la-de>
- [15] INEN 696. (2011). *ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO Y GRUESO*. <https://inencloud.normalizacion.gob.ec/index.php/s/XbjQTR5ejswmD>
- [16] INEN 856. (2010). *Áridos: Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://ia902909.us.archive.org/25/items/ec.nte.0696.2011/ec.nte.0696.2011.pdf>
- [17] INEN 857. (2010). *Áridos: Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://ia802907.us.archive.org/27/items/ec.nte.0857.2010/ec.nte.0857.2010.pdf>



- [18] INEN 855. (2010). Áridos: Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://ia802903.us.archive.org/2/items/ec.nte.0855.2010/ec.nte.0855.2010.pdf>
- [19] NTC 174. (2000). *Concretos: Especificaciones de los agregados para concreto*. Ministerio de Desarrollo Económico. <https://studylib.es/doc/7599795/norma-t%C3%A9cnica-ntc-colombiana-174>
- [20] INEN 3066. (2016). *Bloques de hormigón: Requisitos y métodos de ensayo*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/nte-inen-3066-normas-de-construccion/39594721>
- [21] Morales, L., Santamaría, J., Caicedo, W. y Tipán, F. (2019). Hormigón Estructural de Baja Densidad para Edificaciones. *Rev. Ingenio*, 2(2), 1-13. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/1704/1798>
- [22] García, P. (2016). *El Bloque de Hormigón y su Fábrica*. Asociación Nacional de Fabricantes de Bloques y Mampostería de Hormigón (NORMABLOC). <https://www.andece.org/wp-content/uploads/2019/07/MANUAL-Bloque-de-hormigon-y-su-fabrica-NB.pdf>
- [23] Inmobiliaria La Roca. (2020). *Bloques de Concreto*. La Roca. <https://laroca.com.gt/bloques-de-concreto/>
- [24] Santacruz, W. y Velastegui, E. (2018). *Determinación de Dosificación para Elaborar Bloques Huecos de Hormigón que Cumplan con la Actual Norma NTE INEN 3066* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19369>
- [25] Gómez, E. y Guzmán, M. (2019). *Comparación entre las propiedades físicas y mecánicas de los bloques fabricados con viruta de plástico PET y los bloques tradicionales de acuerdo a la norma NTE INEN 3066* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio institucional Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/3cf39d1b-182d-43dc-82d6-05d53460136a/content>
- [26] Moreno, R. y Cañizares, F. (2011). *Agregado alternativo para fabricación de bloques y adoquines en base a Polietileno Tereftalato* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3968/1/CD-3724.pdf>
- [27] Paguay, E. (2019). *La adición de botellas plásticas PET en la elaboración de bloques alivianados para viviendas unifamiliares y su efecto en la variación de temperatura y acondicionamiento acústico en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/30024/1/Tesis%20I.%20C.%201342%20-%20Paguay%20C%3b3rdova%20Edison%20Andr%C3%a9s.pdf>
- [28] Mustafa, M., Hanafi, I., Mahmoud, R. y Tayeh, B. (2019). Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. *Structures*, 20, 519-526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.008>
- [29] Mahir, H. y Oda, A. (2021). Recycling of plastic box waste in the concrete mixture as a percentage of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122666>
- [30] Marthong, C. (2015). Effects of PET fiber arrangement and dimensions on mechanical properties of concrete. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 8, 111-120. doi: <https://doi.org/10.1080/19373260.2015.1014304>
- [31] Marthong, C. y Kumar, D. (2015). Influence of PET fiber geometry on the mechanical properties of concrete: an experimental investigation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20, 771-784. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1072112>
- [32] Villacis, E., Luna, G., Orbe, L., Zúñiga, P., Nates, J., Velastegui, E. y Santacruz, W. (2020). Dosificación para elaborar bloques huecos de hormigón que cumplan con la actual NTE INEN 3066. *Revista Tecnológica – ESPOL*, 32. doi: <https://doi.org/10.37815/rte.v32n1.688>
- [33] Walpole, R., Myers, R. y Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingenierías y ciencias*. Pearson Educación. [https://verenicafunez94hotmail.files.wordpress.com/2014/08/8va-probabilidad-y-estadistica-para-ingenier-walpole\\_8.pdf](https://verenicafunez94hotmail.files.wordpress.com/2014/08/8va-probabilidad-y-estadistica-para-ingenier-walpole_8.pdf)
- [34] Bernal, K., Calvache, W. y Santamaría, J. (2022). *Análisis físico mecánico y económico de la fabricación de bloques para alivianamiento en losas con fibras de plástico de envase (PET) triturado como alternativa sostenible para la construcción* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio institucional Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/e2f89d48-9212-455a-85a9-a7e6cbfa8dbe>

## Muros de entramado ligero de madera: una revisión del estado del arte

Jaime Encalada<sup>1\*</sup>, Lenin Álvarez<sup>1</sup>, Diego Quizanga<sup>1</sup>, Luisa Viera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador.

\*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, email: [jjencaladao@uce.edu.ec](mailto:jjencaladao@uce.edu.ec)

## Light-frame wood shear walls: A review of the state-of-the-art

### Abstract

Due to the damage caused to timber structures during the 1994 Northridge earthquake, research focused on understanding, designing, and improving the seismic response of lightweight timber framed shear walls has experienced a remarkable growth. The main objective of this state-of-the-art review article is to synthesize the innovations and findings found during the last decade, which are detailed in research articles found in the ScienceDirect database. In order to provide a starting point to serve as a reference to explore future lines of research. The methodology indicated in the PRISMA statement has been adopted to give an adequate diagnosis of the bibliometric information found, additionally by using the VOSviewer tool bibliometric maps based on authors were made. It should be noted that aspects of fire resistance or other environmental factors have been excluded in this work. The presentation of the results is organized according to two key aspects identified in the literature: experimental studies and numerical modelling of light-framed walls.

**Keywords:** Timber structures, bibliometric maps, numerical models, experimental tests, nailed joints, finite elements, nonlinear behavior

### Resumen

Tras el sismo de Northridge en 1994, mismo que ocasionó daños significativos a las estructuras de madera, la investigación sobre la respuesta sísmica de muros de entramado ligero ha experimentado un notable crecimiento. Este interés se ha extendido más allá de la zona afectada. Autores de países con tradición constructiva en madera han experimentado sobre la geometría de los componentes del muro, la conexión entre el marco y el panel de revestimiento y la implementación de nuevos materiales. En complemento a la parte experimental se han desarrollado modelos numéricos que capturan de forma precisa el comportamiento ante carga sísmica. Este artículo de revisión del estado del arte tiene como objetivo sintetizar las innovaciones y hallazgos encontrados durante la última década, mismos que se detallan en artículos de investigación disponibles en la base de datos ScienceDirect, haciendo de este trabajo una referencia inicial para explorar futuras líneas de investigación en países donde este sistema no ha sido mayormente divulgado. Se ha adoptado la metodología indicada en la declaración PRISMA para dar un adecuado diagnóstico de la información bibliométrica encontrada, adicionalmente se realizaron mapas bibliométricos basados en autores empleando la herramienta VOSviewer.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



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

Recibido /  
Received:  
20/02/2024

Aceptado /  
Accepted:  
07/03/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
23/05/2024





Cabe señalar que en este trabajo se han excluido aspectos de resistencia al fuego u otros factores ambientales. La presentación de los resultados se organiza en función de dos aspectos clave identificados en la literatura: los estudios experimentales y la modelación numérica de muros de entramado ligero.

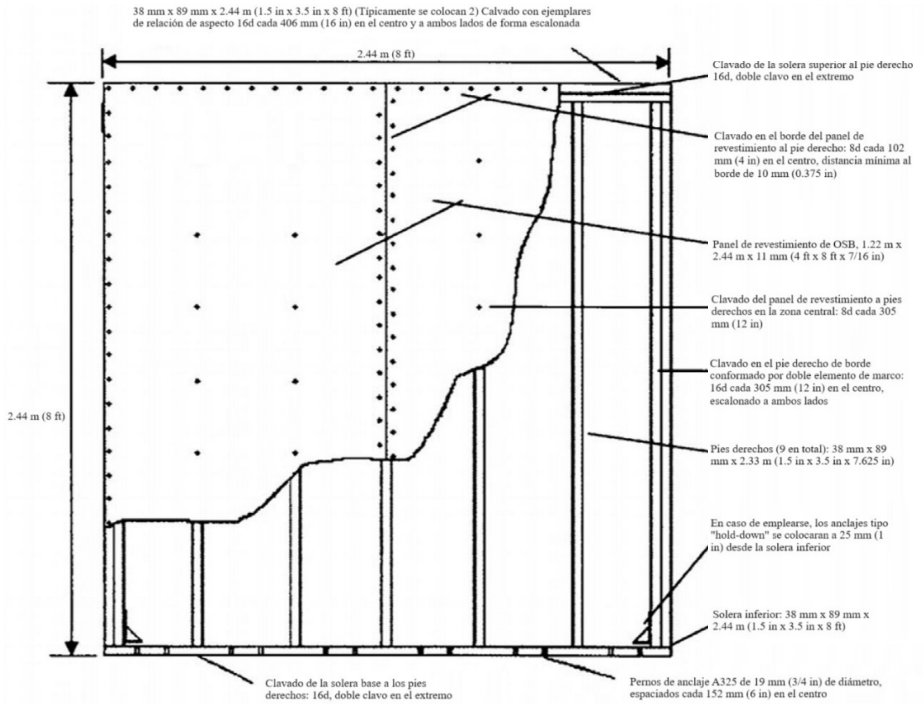
**Palabras clave:** estructuras de madera, mapas bibliométricos, modelos numéricos, ensayos experimentales, uniones clavadas, elementos finitos, comportamiento no lineal

---

## INTRODUCCIÓN

Producto de los daños causados a las estructuras de madera después del sismo de Northridge en 1994, se incrementó la investigación enfocada en mejorar el entendimiento sobre el comportamiento sísmico de los muros de corte de entramado ligero de madera [1]. Diferentes investigadores señalan que la información obtenida en los estudios experimentales y numéricos han ayudado al desarrollo de la metodología de diseño sismorresistente [2,3], pues resulta crucial comprender el comportamiento de la estructura para garantizar la resistencia y la rigidez adecuadas frente a eventos sísmicos [4].

En un edificio de madera los muros de corte junto a los diafragmas horizontales constituyen los elementos primarios del sistema resistente a fuerzas laterales [1]. Un muro de entramado ligero consta de un marco que puede ir desde los 1200 mm de longitud en adelante, con montantes verticales denominados pies derechos — generalmente espaciados a intervalos de 400 mm— junto con elementos horizontales denominados soleras. La escuadría de estos componentes es generalmente de 38 x 89 mm. Por lo general, los marcos tienen un revestimiento (en uno o ambos lados) de paneles de OSB o *plywood* cuya dimensión varía entre 7 y 15 mm. Estos muros pueden tener adicionalmente un panel de yeso en la cara interior. Los clavos que unen el marco con los pies derechos suelen estar espaciados a lo largo de sus bordes en intervalos de 50, 75, 100 o 150 mm; a esta conexión se le denomina S2F por sus siglas en inglés (*sheathing to framing*). Además, los muros cuentan con anclajes de sujeción mayormente del tipo *hold-down* para evitar el vuelco y pernos de corte que sujetan la estructura a la cimentación [5]. La geometría del muro se puede apreciar a detalle en la figura 1 [6].



**Figura 1.** Geometría típica del muro de corte con entramado ligero de madera, tomada de Lebeda et al. [6]

Se ha experimentado con muros de entramado ligero en los que han variado los siguientes aspectos: i) relaciones de aspecto, ii) espesor de los paneles de revestimiento, iii) espaciamiento del clavado que une el panel al marco, iv) separación entre pies derechos que dan soporte al muro, v) material del panel de recubrimiento y vi) sistema de sujeción empleado [4]. De esta forma, el estudio del comportamiento de muros de corte madera de entramado ligero ha sido de gran interés en las últimas décadas debido a su uso como sistema resistente a fuerzas laterales en estructuras de madera de baja altura [7].

Este artículo de revisión del estado del arte tiene como objetivo sintetizar los resultados de una amplia revisión bibliográfica acerca de las variaciones hechas a las principales características constructivas de muros de entramado ligero de madera, con el propósito de mejorar la respuesta estructural que estos presentan ante la acción de cargas laterales; mismas que se han obtenido mediante ensayos experimentales de laboratorio (monotónicos y cíclicos) con el fin de evaluar su influencia en el comportamiento no lineal de este elemento estructural. En este artículo también se incluye una revisión de los trabajos direccionados al modelamiento numérico de estos muros.

Las conclusiones, hallazgos y resultados descubiertos por los investigadores se presentan de forma pertinente en cada sección que compone los resultados de este artículo, para



ser posteriormente discutidos haciendo énfasis en las limitaciones de la evidencia y cómo estas pueden ser solventadas a partir de nuevas innovaciones y hallazgos. De tal forma, este documento sirve como una referencia valiosa para los autores interesados en explorar futuras líneas de investigación, sobre todo en aquellos países donde el entramado ligero de madera no ha sido estudiado a profundidad y mucho menos es utilizado para edificaciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

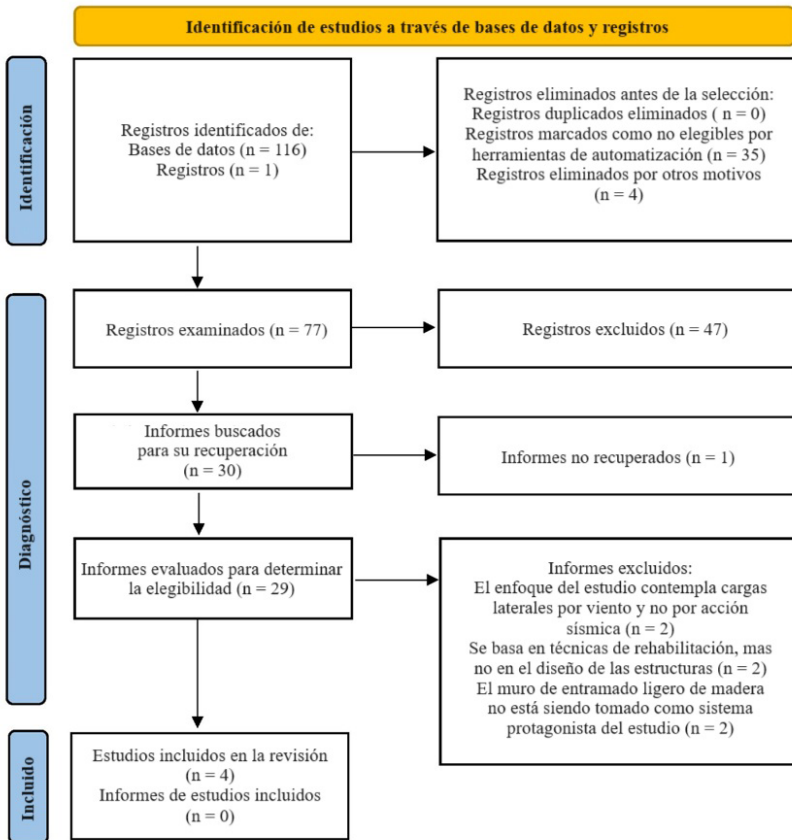
La información recopilada en este artículo se basa en una exhaustiva búsqueda realizada en la plataforma ScienceDirect. Para obtener resultados pertinentes, se empleó una combinación específica de términos de búsqueda: (*light+frame AND (wood OR timber) + shear wall*) NOT (*CLT shear wall OR post and beam OR thermal OR fire OR roof OR cold formed*). Esta instrucción tiene el propósito de excluir artículos que se centren en el estudio de muros construidos completamente con CLT o con el sistema estructural de poste-viga, ya que estos presentan características estructurales diferentes al muro de entramado ligero. Además, se descartaron los términos *thermal* y *fire*. Asimismo, se excluyeron los resultados que contenían los términos *cold formed* y *roof* ya que también existen sistemas de entramado ligero utilizados en pisos, cubiertas y muros de acero. Finalmente, la búsqueda se limitó a presentar resultados de los diez últimos años, rango comprendido entre 2014 y 2023. Únicamente están incluidos artículos de investigación para garantizar la relevancia y actualidad de la información recopilada en este contexto específico.

En este estudio, se emplea una técnica de análisis cuantitativo conocida como bibliometría, la cual ayuda a representar el dominio del conocimiento y a revelar las relaciones entre artículos, revistas y palabras clave [8]. El programa VOSviewer es una herramienta que facilita la visualización de datos bibliométricos obtenidos de una plataforma de búsqueda de datos [9]. La información extraída permite representar en un mapa bibliométrico los autores encontrados en la primera búsqueda de resultados, como se ilustra en la figura 2. Los autores se organizan con una escala de colores, donde el naranja indica su participación reciente en determinado artículo, mientras que el azul representa los trabajos más antiguos.



**Figura 2.** Mapa bibliográfico basado en autores encontrados en la primera búsqueda en ScienceDirect

Para la revisión sistemática se optó por la metodología indicada en la declaración PRISMA 2020 [10]. En la figura 3 se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso de selección de estudios. Para el análisis se identificaron inicialmente 116 resultados a través de la base de datos ScienceDirect. Durante la fase de aplicación de criterios de inclusión y exclusión basados en el año de publicación, que se realizó en la misma base de datos limitando los artículos a aquellos publicados a partir de 2014, el número se redujo a 77 registros para revisión. Luego, se excluyeron otros estudios tras revisar criterios como el título, el resumen y las conclusiones, asegurando que estuvieran dentro del ámbito de interés para la revisión, lo que redujo el número a 30 estudios.



**Figura 3.** Flujograma PRISMA que identifica el proceso de selección de datos para la investigación

En la etapa de diagnóstico se excluyeron trabajos de investigación que inicialmente se percibían como objeto de inclusión en la revisión. En primer lugar, se descartaron dos artículos [11,12] debido a que la investigación desarrollada en los mismos está ligada a cargas laterales por la acción del viento y no a la ocurrencia de un sismo. Se desecharon también dos artículos [13,14] enfocados a la rehabilitación de estructuras más que a un diseño experimental de los muros y, por último, estudios en los que los muros no se toman como principal sistema resistente a fuerzas [15,16].

A medida que avanzaba la revisión, se identificaron y añadieron cuatro estudios adicionales [17,18,19,20], que se consideraron pertinentes para la inclusión, ya que seguían las líneas de investigación tratadas en este artículo. En la figura 4 se observa un mapa bibliométrico con los autores considerados en la sección de resultados. Visualmente, se indica cómo han colaborado en sus investigaciones a lo largo de esta última década, pues la escala de colores tiene el mismo significado que el explicado para la figura 2.

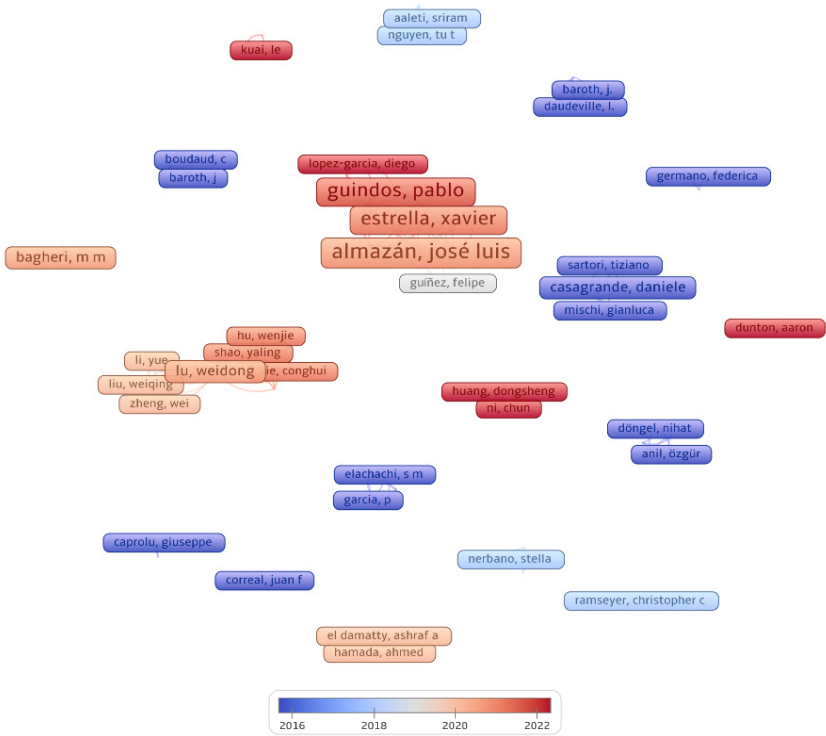


Figura 4. Mapa bibliográfico basado en autores de la etapa final de búsqueda

## RESULTADOS

Una vez realizada la selección final de los artículos y las categorías de organización de estos, se presenta a continuación el trabajo de cada grupo de investigadores en orden cronológico ascendente para cada sección.

### Estudios experimentales

En esta primera sección se albergan aquellos estudios experimentales donde los investigadores han analizado la variación de distintos detalles constructivos, mismos que no representan un cambio abrupto respecto a la concepción propiamente de un muro de entramado ligero de madera. Se revisa también estudios de la conexión S2F y la propuesta de materiales alternativos para conformar el marco, los paneles de revestimiento. En estas investigaciones del tipo experimental, los ensayos de laboratorio en los cuales se aplican cargas cuasiestáticas de forma monotónica o cíclica a los especímenes sirven para una posterior evaluación de las propiedades mecánicas. Esto permite identificar si se han alcanzado mejoras en el rendimiento del muro.



## Variaciones en la geometría y detalles constructivos de los muros

Los dispositivos de anclaje tipo *hold-down* evitan el levantamiento vertical del muro al proveer sujeción a la base. En el caso de muros parcialmente anclados, donde estos dispositivos no soportan toda la sollicitación, la solera inferior distribuye uniformemente las fuerzas de anclaje generadas por la conexión S2F y los pernos de anclaje. Esto puede provocar flexión transversal al eje principal de la solera inferior, resultando en un posible fallo local frágil e indeseado a nivel global del muro [18]. Caprolu et al. [18] investigaron, de forma experimental y numérica, la capacidad de carga de las soleras inferiores en estos casos, identificando dos modos principales de fallo: división en la parte inferior de la solera y división en el borde en contacto con la conexión S2F. La distancia entre el borde de la arandela del perno de anclaje y la cara de la solera conectada al panel de revestimiento influye en el tipo de fallo; si supera los 10 mm, se produce el primer tipo de fallo. Además, sugieren que orientar la médula del riel hacia abajo, en lugar de hacia arriba, proporciona una mayor resistencia.

Anil et al. [19], llevaron a cabo un estudio experimental sobre la inserción de elementos horizontales resistentes entre los pies derechos distribuidos a lo largo de la altura del muro. Estos elementos, de la misma sección que los componentes principales del marco, condujeron a un notable aumento de resistencia, rigidez, ductilidad y capacidad de disipación de energía. Se analizaron variables como la relación de aspecto y la presencia de aperturas para puertas y ventanas. A pesar de que estas aperturas suelen reducir la capacidad resistente del muro, la inclusión de elementos horizontales contrarrestó estos efectos, incluso reduciendo la longitud de las grietas en las esquinas de las aperturas después del fallo del muro.

Shadravan y Ramseyer [21], investigaron técnicas constructivas para mejorar la resistencia lateral de los muros. Encontraron un aumento del 13,2 % en la capacidad de carga lateral al usar clavos anillados de relación de aspecto 8d, espaciados cada 150 mm en los bordes y 300 mm al centro, con pies derechos espaciados cada 405 mm. También exploraron otras técnicas, como el uso de un doble elemento en la solera inferior del muro, anclado por pernos cada 900 mm y aumentando hasta 3 veces la resistencia. Todos los hallazgos de estos investigadores son con respecto a un muro tradicional mostrado en la figura 1. Asimismo, identificaron incrementos porcentuales en la capacidad de los muros con diversas modificaciones: doble elemento en la solera inferior (122 %), placas de asiento para arandelas (33 %), reducción del espaciamiento entre clavos (28,3 %), uso de clavos anillados (13,2 %) y reducción del espaciamiento entre pies derechos (5,8 %).

Sadeghi et al. [20], realizaron pruebas experimentales en su modelo de muro propuesto, el cual emplea elementos de armazón de madera laminada encolada con una sección de 180 x 180 mm<sup>2</sup> en los bordes, superior a la convencional en muros cortantes de entramado ligero de madera. Además, utilizaron un dispositivo de sujeción esquinero robusto y ángulos de conexión de corte para asegurar el muro a la base. Durante el estudio, consideraron espacios libres entre el panel de revestimiento de OSB y los anclajes esquineros, visibles en la figura 5, para prevenir el pandeo prematuro del panel, tanto por cargas sísmicas como por variaciones dimensionales debidas a la humedad. Encontraron, experimentalmente, que la implementación de esta práctica mejora la resistencia al cortante lateral. Concluyeron que es necesario mejorar la conexión entre

los pies derechos de borde y la solera superior, incrementando la rigidez axial al emplear más de dos tornillos en el punto de conexión, mejorando la resistencia al corte y el desplazamiento horizontal durante el estado límite de servicio del muro.



**Figura 5.** Espacios libres entre el panel de revestimiento y los anclajes esquineros, tomada de Sadeghi et al. [20]

Guiñez et al. [5], presentaron los resultados de 17 ensayos, entre monotónicos y cíclicos, aplicados a muros con características distintivas como lo son un conjunto de 5 elementos que componen los pies derechos de borde a cada lado y la disposición de *hold-downs* de mayor resistencia a los usados comúnmente. Ambas caras son revestidas con paneles de OSB que se clavan al armazón cada 50 o 100 mm en los bordes. Las conclusiones expuestas por los autores informan de un amortiguamiento viscoso equivalente característico del 9 % en promedio para todos los ensayos. Ni el espaciamiento del clavado ni la longitud de los muros influye en la ductilidad que es en promedio 3,75. Al comparar la respuesta de una probeta ante carga cíclica y monotónica, se encuentra que, durante el ensayo cíclico la resistencia al corte se ve reducida entre 8 % y 16 %, donde los muros con clavado de 50 mm tienen una menor afectación. Sin embargo, esta separación no influye en la rigidez del muro, propiedad que es definida por la longitud del elemento estructural. Sus resultados experimentales comparados con los valores teóricos de la SDPWS (*Special Design Provision for Wind and Seismic*) [22], tienen una mayor resistencia, pero menor rigidez a corte. En referencia al Código de Diseño Sísmico Chileno [23], proponen un aumento del límite de deriva actual hasta un valor de 0,4 %, nivel al cual no se han observado daños a la estructura.

Bagheri y Doudak [4], investigaron el comportamiento estructural de 26 especímenes de prueba con diferentes detalles de construcción y presentaron un modelo numérico analizado en la sección correspondiente del presente trabajo. Las observaciones extraídas por los autores en la parte experimental indican que la adición de más elementos a los pies derechos borde y el cambio de dimensiones de estos no tiene un efecto significativo en la capacidad general del muro, aunque sí un efecto menor sobre la rigidez. Los paneles de revestimiento más gruesos confieren una mayor resistencia y rigidez sin afectar el radio de ductilidad, independientemente del material (*plywood* u OSB). Si bien se ha encontrado que el diámetro de los clavos y el espaciamiento afecta significativamente la resistencia, no hay una relación lineal que describa este efecto.

Orellana et al. [3], investigaron el comportamiento de muros de corte con marcos de madera chilena calificada MGP10 a escala real. Estas muestras tenían una altura de 2470 mm y se probaron en tres longitudes diferentes: 1200, 2400 y 3600 mm. Encontraron





que la capacidad máxima de carga lateral aumentó en promedio un 37 % respecto a lo presentado por Guiñez et al. [5], (variando entre el 8 % y el 63 %) cuando se aplicó carga axial de compresión y momento volcante además de la carga netamente horizontal. Asimismo, la rigidez inicial mostró un incremento del 141 % (variando entre el 103 % y el 191 %), mientras que la capacidad de disipación de energía aumentó un 104 % (variando entre el 36 % y el 156 %). Por último, la relación de ductilidad experimentó un aumento del 55 % (variando entre el 22 % y el 87 %).

Estrella et al. [24], llevaron a cabo pruebas para evaluar el comportamiento de cuatro muestras con diferentes configuraciones bajo condiciones laterales, utilizando sujeciones de varillas continuas, en comparación con muros sujetos a anclajes discretos. Los resultados de su investigación indican que el uso del sistema de varilla continua aumenta la resistencia del muro en un 35,8 % y permite un comportamiento elástico hasta derivas aproximadas de 0,8 %. Además, al reducir el espacio de clavado de 100 a 50 mm en una de las configuraciones, se observó un incremento del 21,7 % en la rigidez y un aumento del 40 % en la resistencia. Aunque el diámetro de la varilla no tuvo un impacto significativo en estos parámetros, se encontró que el uso de una varilla de mayor diámetro (44,5 mm) y una configuración de clavado con un espaciado de 50 mm aumentó la ductilidad hasta 6,32 en uno de los especímenes.

Qiang et al. [25], presentan una variación constructiva al conectar los paneles de revestimiento al marco con tres filas de clavos en lugar de una sola alrededor de los bordes. Tras ensayos cíclicos en 10 especímenes, se encontró una resistencia lateral hasta tres veces más que la de muros estándar. También se observaron mejoras en la rigidez inicial y la deformación a la falla. Los autores llevaron a cabo una equivalencia sísmica con los muros estándar según la normativa ASTM D7989 [26]. En este procedimiento determinaron valores de diseño que resultaron ser menos del doble que los correspondientes a muros estándar. Esta aparente contradicción se justifica por la necesidad de aplicar un factor de sobrerresistencia mayor que garantiza el cumplimiento de los criterios de ductilidad establecidos en la normativa de referencia.

### **Conexión entre armazón y panel de revestimiento, conexión S2F**

El entendimiento de la histéresis en las conexiones entre el armazón y el panel de recubrimiento es crucial para comprender la respuesta dinámica de las estructuras de madera, ya que permite calcular la cantidad de energía disipada. Según Lam et al. [1], este comportamiento complejo surge debido a la fluencia de los sujetadores (generalmente clavos), las propiedades de la madera en el muro y la formación de espacios holgados en los puntos de conexión como resultado de la acción dinámica. A medida que la carga actuante varía, el sujetador ejerce presión sobre la madera en el área de contacto, causando deformaciones permanentes. Al invertir la carga, el sujetador se desplaza a través del espacio creado, generando holguras en sentido opuesto, en un proceso cíclico que incrementa estas aperturas a cada paso, resultando en una deformación flácida y una apariencia de "pellizco" (*pinching*) en el bucle de histéresis.

La conexión S2F puede realizarse también empleando grapas en lugar de la forma más común: por medio de clavos. Verdret et al. [27], estudiaron la orientación de las grapas en relación con las fibras del armazón, utilizando OSB de 12 mm y elementos



de armazón de madera C24 (45 x 145 mm<sup>3</sup>). Determinaron que las grapas deben tener dimensiones específicas para ser comparables con clavos roscados según el Eurocódigo 5 [28]. Los ensayos monotónicos mostraron que las conexiones grapadas a 0° tienen un 20 % menos de capacidad de carga que las orientadas a 90° y que las clavadas, también ensayadas para efectuar comparaciones. Sin embargo, las grapas a 0° mostraron mayor rigidez debido al anclaje con el pie derecho. Además, la velocidad de carga en ensayos cíclicos afectó la carga máxima observada en las conexiones clavadas, mientras que las grapadas resultaron menos afectadas en términos de ductilidad evaluada según la normativa ASTM E 2126 [29].

Germano et al. [30], investigaron el impacto de la superficie del vástago en conexiones clavadas, comparando clavos lisos con anillados. Descubrieron que, para un diámetro de clavo equivalente, la resistencia de las conexiones con clavos anillados es 1,75 veces mayor que las de superficie lisa. A pesar de observar una disminución en la rigidez inicial con clavos anillados debido a las holguras que provocan las estrías en la madera, los autores sugieren que se necesitan más estudios para evaluar completamente este efecto.

Zheng et al. [31], realizaron un estudio sobre conexiones utilizando tornillos autorroscantes y paneles de *ply-bamboo*. Aunque el uso de este material podría ubicar el estudio en el apartado de materiales alternativos para armazón y revestimiento, las conclusiones presentadas por los investigadores justifican su inclusión en esta sección. Realizaron ensayos monotónicos en veinte grupos de conexiones con *ply-bamboo* atornilladas a un elemento de armazón (*ply-bamboo sheathing-to-framing screwed*, PSFS) y dos grupos adicionales de conexiones tradicionales clavadas con paneles de OSB. Los resultados indicaron que el uso de tornillos autorroscantes proporciona una resistencia y desplazamiento últimos 2,5 y 2 veces mayores que las conexiones tradicionales con clavos y paneles de OSB. Además, destacan que el espesor del panel de *ply-bamboo* y la distancia al tornillo no afectan significativamente las propiedades mecánicas, como sí lo hace la dirección de carga con respecto a las fibras de la madera del marco, donde se observa mayor rigidez, resistencia y ductilidad en la orientación paralela. Los autores atribuyen las variaciones principalmente a vacíos e imperfecciones en el *ply-bamboo*.

### **Materiales alternativos en elementos de marco y paneles de revestimiento**

Echeverry y Correal [32], proponen el uso de guadua laminada (*Laminated Guadua Mats*, LGM) para los elementos del marco y paneles de revestimiento. Su estudio evalúa experimentalmente el comportamiento no lineal de conexiones S2F compuestas de clavos y LGM, utilizando dos tamaños diferentes de clavos y aplicando la carga en dirección paralela y perpendicular a las fibras del panel de revestimiento. Observaron una mejor respuesta con clavos de mayor tamaño. Además, desarrollaron un modelo numérico con el *software* CASHEW [33], para evaluar el potencial de los muros de corte fabricados completamente de LGM, basándose en los resultados de los ensayos de las conexiones. Afirman que estos muros tendrían una capacidad similar a los fabricados con materiales tradicionales como la madera. Señalan también que las pequeñas diferencias en rigidez y resistencia se deben a variaciones en la calidad de la LGM, atribuibles a procesos de fabricación que deben ajustarse para eliminar vacíos e imperfecciones.



Nguyen et al. [34], llevaron a cabo una investigación experimental sobre la integración de pies derechos postensados de madera contra laminada (CLT) en un muro híbrido de 5486 mm de largo por 2438 mm de alto. El sistema, ilustrado en la figura 6, consta de tres muros tradicionales, donde dos de ellos se conectan mediante seis clavos normales (por cada muro) de relación 16d (89 x 3,43 mm) que anclan los pies derechos de borde al elemento compuesto por cinco capas de CLT (133 x 610 x 2440 mm). Se aplicó una fuerza de 97,86 kN para ejecutar el postensado mediante 7 cables de acero ( $F_y = 1530$  MPa) de 12,7 mm de diámetro colocados a lo largo de un ducto al interior del panel de CLT. El estudio evalúa el comportamiento sísmico del sistema y concluye que se desempeña bien ante el MCE (máximo terremoto considerado), con una deriva máxima inferior al 1 %. Se atribuye este resultado a la alta rigidez y eficiente capacidad de autocentrado proporcionadas por el CLT postensado, complementadas con la disipación de energía de los muros tradicionales. Por ello, los autores sugieren este sistema como una solución para edificaciones residenciales de mediana a gran altura.

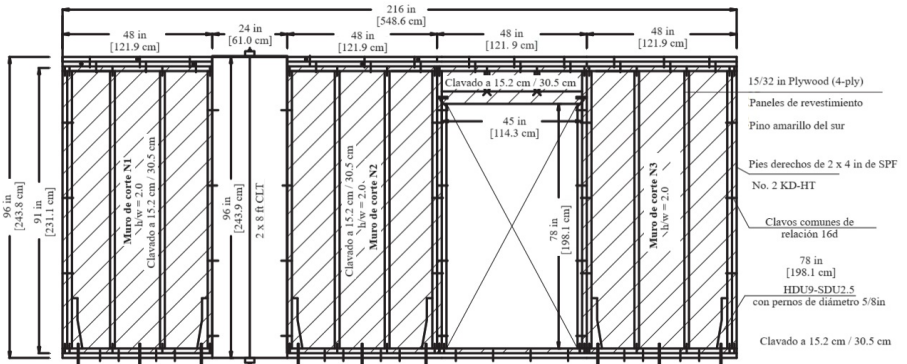


Figura 6. Sistema de muro híbrido CLT - Light frame, tomada de Nguyen et al. [34]

Yue et al. [35], realizaron una investigación experimental con cinco muros a escala real (2400 x 2400 mm) utilizando madera tipo *plywood* densificada, fabricada con chapas de álamo de 2 mm de espesor, prensadas a 130 °C con adhesivo de fenol-formaldehído, logrando densidades de 550, 650 y 840 kg/m<sup>3</sup> mediante la colocación ortogonal de 7, 9 y 12 chapas de álamo, respectivamente. Se evaluó la factibilidad de la madera densificada como revestimiento de muros y su impacto en el desempeño lateral mediante ensayos monotónicos. Se observó una mejora en el rendimiento lateral con el aumento de la densidad del revestimiento, destacando el mejor desempeño del espécimen con densidad de 840 kg/m<sup>3</sup>. Además, se constató que el rendimiento de un muro con un panel marginalmente densificado es cercano al de uno completamente densificado, evitando el desgarro del revestimiento y focalizando el daño hacia los conectores (clavos). Al comparar los resultados experimentales con el modelo elastoplástico de Casagrande et al. [36], se encontró un error de aproximadamente el 10 %, sugiriendo la utilidad de este modelo en el diseño de muros con este tipo de revestimiento.

Valdivieso et al. [37], investigaron cómo los acabados no estructurales afectan las propiedades de un muro compuesto por múltiples capas (MLSSW). Utilizaron paneles



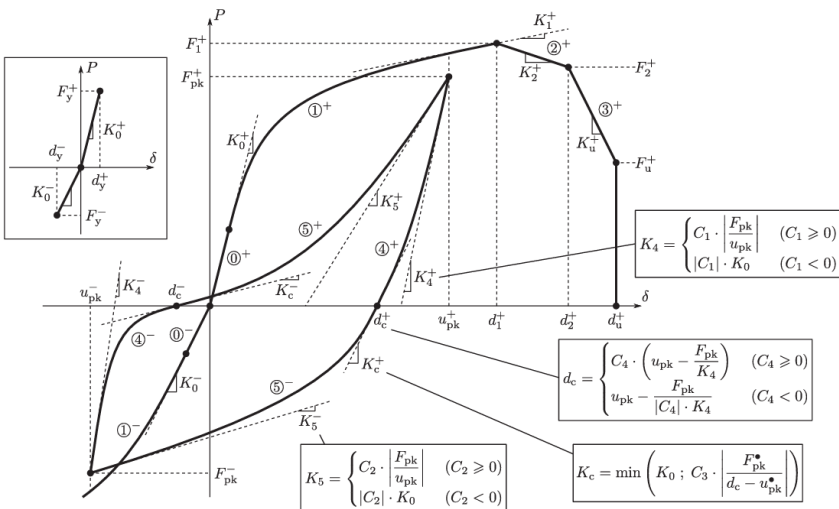
de yeso Tipo X (GWB) para revestir un MLSSW y compararon con uno sin revestimiento. Los acabados aumentaron la resistencia (160 %) y rigidez (53 %), aunque la ductilidad disminuyó (16 % - 42 %). Aun así, la energía disipada fue comparable a la de los muros sin revestimiento. En resumen, los muros con acabados tienen características histeréticas similares a los muros sin revestimiento.

### Estudios numéricos

En la presente sección se contemplan análisis, metodologías, enfoques y modelos propuestos por los investigadores citados para el desarrollo de un modelado no lineal y diseño de los muros de madera estudiados en forma efectiva. Dentro de esto se puede encontrar modelos que caracterizan el comportamiento histerético de las conexiones S2F para incorporarlos a enfoques de modelado no lineal basado en elementos finitos (FE). Dada la complejidad de los modelos, algunos autores proponen simplificaciones para representar estructuras de varios niveles con resultados de análisis aceptables. Las investigaciones en el diseño de muros parten de la propuesta de estos elementos en edificaciones de mayor altura, expuestas a solicitaciones verticales y horizontales en el caso de zonas de alta sismicidad.

### Enfoques de modelado

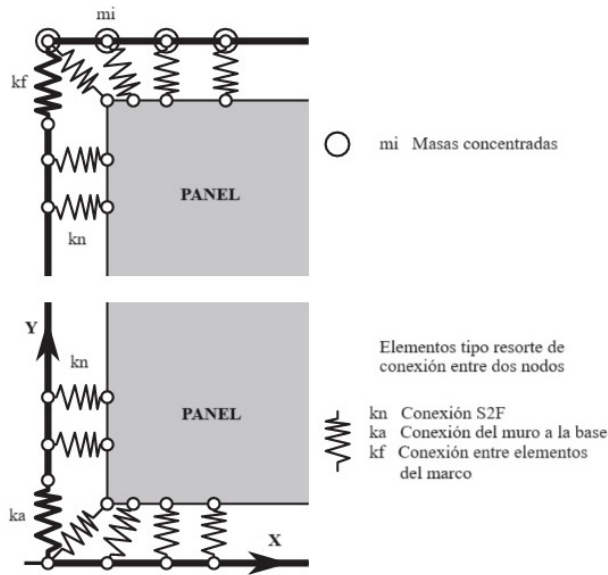
Humbert et al. [38,39], presentaron un estudio en dos partes. En la primera, desarrollaron un modelo de elementos finitos calibrado mediante ensayos de laboratorio para determinar los parámetros del modelo histerético que se muestra en la figura 7, mismo que describe el comportamiento no lineal de las uniones S2F, representadas dentro del modelo de elementos finitos por medio de resortes de conexión entre dos nodos.



**Figura 7.** Ley constitutiva de histéresis empleada por Humbert et al. para modelar el comportamiento no lineal de las conexiones S2F [38]

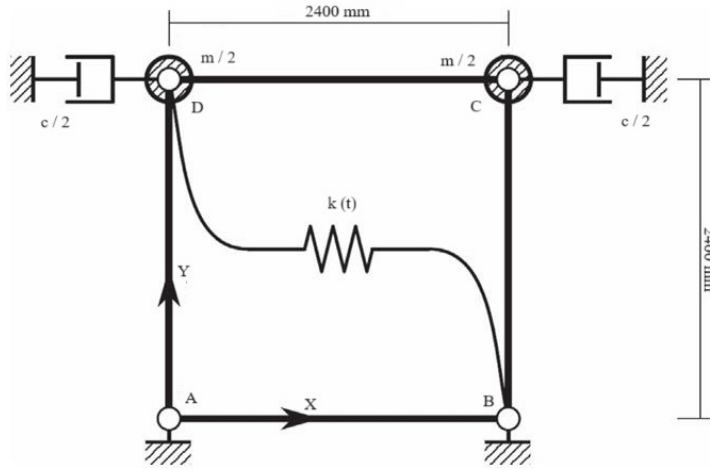


El arreglo completo se muestra en la figura 8, donde se tiene además elementos tipo viga Euler para dar forma al marco y elementos de tensión en el plano que conectan 4 nodos para dar forma al revestimiento. Validaron el modelo con 14 muros sometidos a carga cuasiestática en ensayos monotónicos y cíclicos, encontrando una buena concordancia entre las predicciones del modelo de elementos finitos y los experimentos reales.



**Figura 8.** Composición del modelo complejo de elementos finitos propuesto por Humbert et al. [38]

Boudaud et al. [38,39], en su segunda investigación, validaron su modelo de elementos finitos bajo carga dinámica, utilizando 11 muros de corte en una mesa vibratoria. Con los resultados de su investigación anterior ante carga cuasiestática calibraron el modelo para carga dinámica, obteniendo una buena concordancia entre los resultados experimentales y los del modelo. Proponen una simplificación a su modelo, consistente en cuatro elementos de marco rígidos, un elemento de conexión semirrígido, dos masas concentradas y dos amortiguamientos, como se ve en la figura 9. Esta simplificación, aunque menos compleja, ofrece resultados comparables al modelo original con una reducción significativa en esfuerzos computacionales, lo que la hace un método eficiente para modelar muros de una edificación completa.



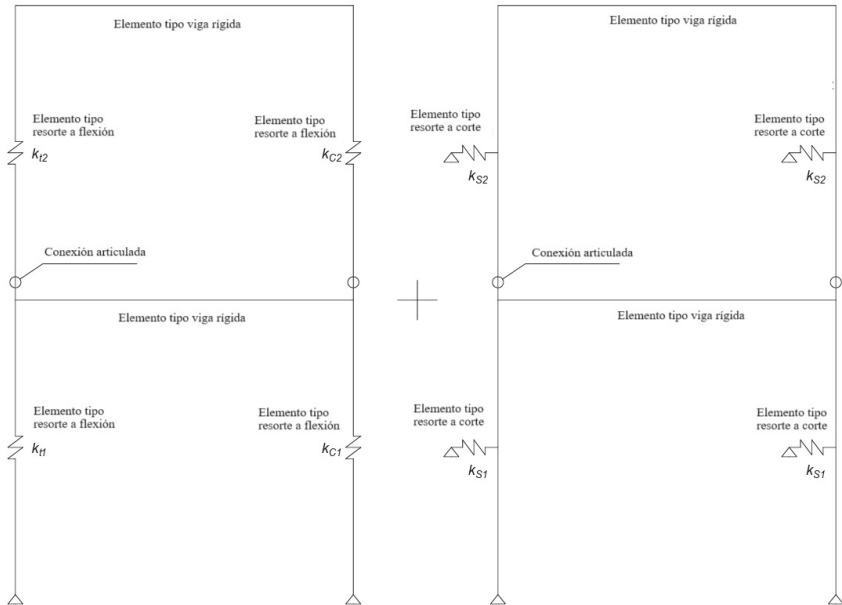
**Figura 9.** Composición del modelo de elementos finitos simplificado propuesto por Boundat et al. [39]

Casagrande et al. [17], proponen la Ec. 1 para describir el comportamiento elástico de muros de un solo nivel, considerando la contribución a la deformación lateral de la conexión S2F ( $\Delta_{sh}$ ), la rotación ( $\Delta_h$ ), la traslación de cuerpo rígido ( $\Delta_a$ ) y la deformación de los paneles de revestimiento ( $\Delta_p$ ). Se identifica que las mayores contribuciones a la deformación total en muros de entramado ligero son de las conexiones S2F y la rotación de cuerpo rígido, asociada a la deformación por tensión de los *hold-downs*. Además, se aborda el análisis de la rigidez en dos regímenes: uno donde los *hold-downs* son insignificamente solicitados y otro donde sí están siendo solicitados. La relación que expresa la rigidez en este último caso se formula en la Ec. 2, donde se evidencia que la rigidez total depende de los mismos parámetros que caracterizan la deformación. Los investigadores concluyen que la rigidez del muro es linealmente proporcional a su longitud, pero esta relación solo es válida durante el primer régimen de rigidez.

$$\Delta = \Delta_{sh} + \Delta_h + \Delta_a + \Delta_p \quad (1) [17]$$

$$\frac{1}{K_{tot}} = \frac{1}{K_{SH}} + \frac{1}{K_P} + \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_H} \quad (2) [17]$$

Peng et al. [40], desarrollaron un modelo simplificado de elementos finitos para analizar muros de corte de madera de uno y varios niveles. Este modelo, representado en la figura 10, consta de elementos de conexión laterales conectados por una viga rígida, simulando cada piso del muro.



**Figura 10.** Composición del modelo de elementos finitos simplificado propuesto por Peng et al. [40]

Se incorporan resortes de compresión, corte y tensión, derivados de un modelo numérico detallado que simula todos los componentes del muro. Los resultados muestran diferencias mínimas entre el modelo simplificado y el detallado. Por ejemplo, para muros de un solo nivel, las diferencias en rigidez inicial y fuerza cortante pico son del 2,88 % y 0,48 %, respectivamente. Sin embargo, al considerar muros de cuatro niveles, estas diferencias aumentan al 15 % y 13,2 % en muros sin varillas de sujeción, aunque se reducen al 6,7 % y 1,4 % al incluir estos dispositivos. Por lo tanto, los autores concluyen que el modelo simplificado es aceptable debido a la significativa reducción en el tiempo de cálculo y esfuerzo de modelado, lo que lo hace una herramienta práctica y eficiente para el análisis de muros de corte de madera.

Estrella et al. [2], proponen un enfoque simplificado para modelar muros de alta resistencia, centrándose en características especiales como pies derechos de borde robustos y *hold-downs* de baja deformación. Su método se basa en la medición de deformaciones diagonales debidas a cargas laterales cíclicas para obtener los diez parámetros del modelo MSTEW [41], los cuales se presentan en la tabla 1, considerando diferentes configuraciones constructivas. Este modelo permite que un resorte no lineal de un solo grado de libertad (SDOF) represente el comportamiento del muro completo. Al examinar las conexiones S2F, los autores observan que las esquinas del panel son áreas críticas que demandan más deformación y disipación de energía. Por lo tanto, proponen ajustar el patrón de clavado para mejorar la resistencia. No obstante, aún no se ha llevado a cabo una validación experimental de esta modificación.



**Tabla 1.** Parámetros para el modelado no lineal en un solo grado de libertad (SDOF), en base al modelo histerético MSTEW de un muro de entramado ligero de madera propuestos por Estrella et al. [2]

Propiedades del muro		Parámetros para el modelo histerético MSTEW									
OSB	Espaciamento del clavado (mm)	$K_0$ (kN/mm/m)	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$F_0$ (kN/m)	$F_1$ (kN/m)	$\delta_u$ (mm)	$\alpha$	$\beta$
A un solo lado	50	2,374	0,072	-0,046	1,000	0,017	10,275	2,048	45,450	0,532	1,139
	100	1,393	0,079	-0,101	1,047	0,015	9,600	1,603	57,300	0,531	1,146
	150	1,080	0,079	-0,090	1,075	0,014	7,104	1,202	55,820	0,522	1,150
A ambos lados	50	2,487	0,097	-0,080	1,002	0,021	26,685	2,935	42,887	0,800	1,150
	100	2,786	0,079	-0,101	1,047	0,015	19,196	3,205	57,300	0,531	1,146
	150	2,159	0,079	-0,090	1,075	0,014	14,208	2,403	55,820	0,522	1,150

Kuai et al. [42], desarrollaron un nuevo modelo numérico de un conector elastoplástico para representar la conexión S2F, integrándolo en un modelo de elementos finitos (FE) previamente desarrollado [43]. Este modelo se probó en dos muros de corte a escala real sometidos a carga cíclica, comparándolos con simulaciones. Los resultados mostraron que los conectores pueden prever tanto deformaciones elásticas como inelásticas bajo cargas cíclicas, con una precisión razonable en la predicción de dichas deformaciones. Además, se observó que la ubicación de la concentración de tensión crítica en los paneles de revestimiento coincidió con los puntos de fractura en las paredes de prueba. A partir de estas simulaciones, se concluyó que la rigidez y resistencia a la estantería de los muros de corte de doble capa pueden aproximarse a partir de los resultados de paredes de una sola capa. Sin embargo, debido a la complejidad del desarrollo del modelo de conexión, se sugiere consultar la publicación original para más detalles.

Dunton et al. [44], desarrollaron modelos probabilísticos basados en ensayos experimentales para predecir la fuerza cortante y la deriva en muros cortantes de marcos ligeros de madera. Estos modelos ajustan las predicciones de fuerza cortante a los valores del código SDPWS [22] tras corregir el sesgo. Este modelo tiene la ventaja de incorporar la física de la deformación y desacoplar la contribución de las capacidades individuales de los clavos. Aunque los modelos de capacidad de deriva tienen desviaciones estándar mayores debido a la falta de información detallada sobre algunos componentes, representan una mejora sustancial respecto a los modelos deterministas. Se recomienda revisar las expresiones analíticas en la publicación original para una comprensión más detallada.

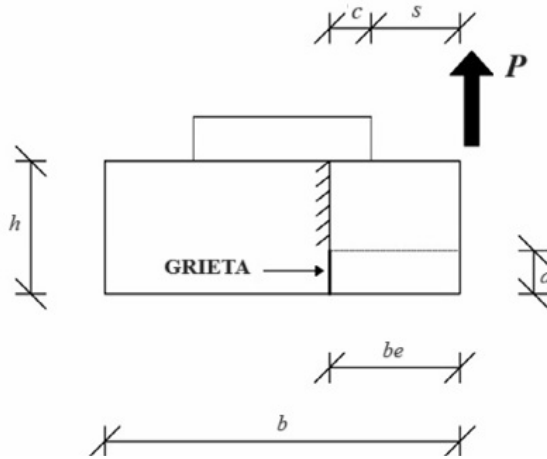
### Enfoques de diseño

La investigación realizada por Caprolu et al. [18], se centra en evaluar expresiones previamente desarrolladas [45,46], determinando la capacidad de carga resistente antes de que se produzca la división en la solera inferior. Con base en datos de ensayos experimentales de ruptura de este elemento [47,48], llevaron a cabo pruebas de energía de fractura y resistencia a la tensión perpendicular a la fibra. Estas pruebas son cruciales, ya que los resultados obtenidos son valores esenciales para evaluar las expresiones

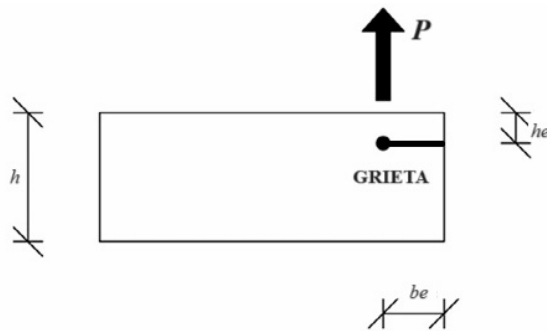




numéricas. Los autores indican que la carga asociada a la falla por división de la cara inferior de la solera se determina mediante la Ec. 3, mientras que el segundo modo de falla se aborda mediante la Ec. 4. Los parámetros utilizados en estas ecuaciones se presentan en las figuras 11 y 12.



**Figura 11.** Parámetros geométricos de la Ecuación 3, la cual determina el fallo de la solera base por ruptura en la cara inferior, tomada de Caprolu et al. [18]



**Figura 12.** Parámetros geométricos de la Ecuación 4, la ruptura de la solera inferior ocurre perpendicular a la carga "P", a una distancia "he" desde el borde superior del elemento, tomada de Caprolu et al. [18]

Es importante destacar que algunos de estos parámetros no están visibles en los gráficos, por lo que se proporcionan explicaciones claras:  $l$  corresponde a la longitud de la solera,  $G$  es el módulo de resistencia a corte,  $G_f$  es la energía a la fractura,  $E$  es el módulo de elasticidad,  $\beta_s$  es el factor de corrección por cortante, y  $ft$  es la resistencia a tracción perpendicular a la fibra.

$$P = lh \frac{\sqrt{2GG_{\#}/b_e}}{\sqrt{12\frac{G}{E}\frac{b_e}{h} + \sqrt{\beta_s}}} \quad (3) [18]$$

$$P = \gamma l C_1 \sqrt{\frac{h_e}{1 - \frac{h_e}{h}}} \quad (4) [18]$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2\zeta + 1}} \quad (5) [18]$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{5}{3} GG_{\#}} \quad (6) [18]$$

$$\zeta = \frac{c_1}{f_t} \sqrt{10 \frac{G}{E} \frac{1}{h_e}} \quad (7) [18]$$

Bagheri y Doudak [7], investigaron muros de dos niveles para evaluar los efectos acumulativos (deflexión lateral y la rotación de cuerpo rígido), en la deflexión total. Al estimar la deflexión basándose en la suposición de efectos acumulativos, observaron ligeras diferencias con las observaciones experimentales, las cuales no consideran la rigidez fuera del plano de los diafragmas de piso. Los mayores efectos acumulativos provienen de la rotación por cuerpo rígido, generada por la elongación de los *hold-downs*. Su modelo numérico confirmó que esta suposición es válida para muros apilados sin considerar la rigidez fuera del plano de los diafragmas. Señalaron que las expresiones de diseño tienden a sobreestimar ligeramente la deflexión, especialmente en niveles superiores, debido al significativo efecto de la rigidez fuera del plano de los diafragmas que no está considerado dentro de la expresión. Este efecto persiste incluso con valores conservadores de mínima rigidez fuera del plano o la sola presencia de vigas de borde. La deflexión total esperada por efectos acumulativos para el segundo nivel de piso  $\Delta_{T2}$ , se determina mediante la Ecuación 8, donde  $\Delta_1$  y  $\Delta_2$  representan las deflexiones singulares de cada piso,  $\Delta_{bc}$  es la deflexión por flexión y  $\Delta_{ac}$  por rotación de cuerpo rígido.

$$\Delta_{T2} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{bc} + \Delta_{ac} \quad (8) [7]$$

Orellana et al. [3], realizaron un análisis numérico para una estructura de madera de cinco pisos con el fin de considerar los efectos de las cargas verticales al diseñar, siendo que no existe un procedimiento estándar para hacerlo en construcciones para estructuras de madera. En su investigación representan la estructura con dos análisis no lineales. Para la creación de los modelos se reprodujo la respuesta lateral que se prueba en su estudio experimental, empleando el modelo CASHEW [33] y la no linealidad se introdujo a través de las conexiones S2F empleando el modelo MSTEW [41]. Tras el resultado del análisis señalan que las cargas verticales elevadas pueden tener un impacto relevante sobre el comportamiento lateral, aumentando la capacidad del edificio en sus ejes X y Y un 51,4 % en promedio e incrementando la rigidez inicial del 20,7 %. También obtuvieron una mayor ductilidad y la disminución de las derivas de piso, determinando que la estructura mejora su comportamiento cuando se consideran las cargas verticales.



Estrella et al. [49], llevaron a cabo una investigación basada en experimentación y desarrollo de modelos numéricos para proponer factores de desempeño sísmico (SPFs) menos restrictivos para edificios con estructuras de madera. Como resultado de su investigación observaron que una adopción de  $R = 6,5$  como valor modificador de respuesta y una deriva máxima de piso  $\Delta_{\max} = 0,004$ , en lugar de los valores de referencia  $R = 5,5$  y  $\Delta_{\max} = 0,002$ , representan una reducción del 15,3 % en el índice de margen de colapso promedio de los grupos de especímenes bajo estudio, sin que ninguno de ellos mostrara una probabilidad de colapso mayor al 10 % para aceleraciones correspondientes al máximo terremoto considerado (MCE). La utilización de SPFs menos conservadores mejora la rentabilidad de las estructuras de madera y puede aumentar su competitividad con respecto a otros materiales. El nuevo conjunto de SPFs resulta en un ahorro del 40,4 % en el patrón de clavado de paneles OSB, un 15,9 % en paneles OSB y un 7,3 % en vigas de madera para un estudio de caso de un edificio de cinco pisos.

Berwart et al. [50], han estudiado la viabilidad del sistema estructural en zonas sísmicas de alta demanda, desarrollando la metodología simplificada STTP (*Simplified Toll for Technical Pre-feasibility*). Esta herramienta, dirigida a profesionales con poca experiencia en madera, requiere solo el cálculo de parámetros geométricos y la aplicación de factores de penalización. Introducen el concepto de longitud ficticia, que se basa en la relación entre la longitud real y una reducida, considerando la pérdida de rigidez del muro. La metodología, basada en el análisis de 201 edificaciones, permite estimar el periodo fundamental del muro y calcular el cortante basal de diseño. Se evalúa la viabilidad técnica del número de metros lineales proyectados y el tipo de dispositivos de anclaje adoptados, con valores máximos sugeridos para edificaciones de tres a seis pisos. Esta metodología no reemplaza el diseño estructural final, sino que sirve como etapa de prediseño, proporcionando información sobre el tipo de dispositivo de anclaje necesario.

## DISCUSIÓN

### Con respecto a la sección: Estudios experimentales

#### Interpretación general de los resultados

Los estudios revisados en las tres divisiones de esta primera sección proporcionan una comprensión detallada de diversos aspectos relacionados a los muros de entramado ligero de madera. En la primera parte, se destacan las variaciones en la geometría y los detalles constructivos de los muros, mostrando cómo diferentes enfoques pueden mejorar la resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía de estos sistemas. Se identifican prácticas como la inclusión de elementos horizontales resistentes [19] y el empleo de técnicas constructivas mejoradas [21], así como la influencia del tipo de dispositivo de sujeción [24] y la orientación de los elementos del armazón en el rendimiento estructural [18].

Luego de esto, se profundiza en la conexión entre el armazón y el panel de revestimiento, destacando la importancia de comprender la histéresis en estas conexiones para calcular la cantidad de energía disipada [1]. Se analizan diferentes tipos de sujetadores y su efecto en la resistencia y rigidez de las conexiones, así como la influencia de la



velocidad de carga en el comportamiento estructural [27]. Se exploran opciones como el uso de grapas [27], tornillos autorroscantes [31] y clavos anillados [30] para mejorar el rendimiento de estas conexiones.

Por último, dentro de las mejoras al rendimiento estructural, se examina el uso de materiales alternativos en elementos de armazón y paneles de revestimiento. Se destacan materiales como la guadua laminada [32], el CLT postensado [34] y la madera densificada [35] como opciones viables para mejorar el rendimiento estructural y sísmico de los muros de corte de madera. En resumen, los estudios revisados ofrecen una visión integral de cómo mejorar el rendimiento sísmico y la durabilidad de los muros de entramado ligero de madera, destacando la importancia de considerar cuidadosamente los detalles constructivos, las técnicas de conexión y la elección de materiales para lograr estructuras seguras y eficientes.

### **Limitaciones de la evidencia**

En los estudios expuestos en el apartado de variaciones a la geometría y detalles constructivos de los muros, se evidencia que las pruebas se hacen con carga cuasiestática monótonica o cíclica [3,4,5,19,21,24,25]. No se ha encontrado, al menos dentro de las limitaciones de búsqueda en esta investigación, que los prototipos propuestos por los distintos autores hayan sido sometidos posteriormente a ensayos donde se emplee una mesa vibratoria para determinar su comportamiento bajo excitación sísmica.

Al explorar el uso de materiales alternativos en elementos de armazón y paneles de revestimiento, se destaca la limitación en cuanto a la falta de datos a largo plazo sobre el rendimiento y la durabilidad de estos materiales en aplicaciones estructurales [32,35]. Aunque se presentan resultados prometedores sobre el comportamiento de estos materiales en pruebas experimentales, la falta de información sobre su comportamiento a lo largo del tiempo podría limitar su adopción generalizada en la práctica [32,35].

### **Implicaciones de los resultados en la práctica, políticas e investigaciones futuras**

Orientados hacia la práctica dentro de la ingeniería estructural, los estudios resaltan la importancia de considerar cuidadosamente la geometría y los detalles constructivos de los muros de entramado ligero de madera, así como la elección adecuada de materiales y técnicas de construcción [21]. Se sugiere la adopción de técnicas específicas, como la incorporación de elementos horizontales resistentes y la mejora de las conexiones entre los elementos estructurales, para mejorar la resistencia y la capacidad de disipación de energía de los muros. En cuanto a las implicaciones políticas, los autores citados en ambas secciones de este artículo subrayan la necesidad de actualizar y mejorar las regulaciones y códigos de construcción relacionados con las estructuras de madera [3,5,27,30,49].

En términos de investigación futura, haciendo referencia a las limitaciones de la evidencia, se sugiere la implementación de ensayos sobre mesa vibratoria a prototipos de escala real o reducida. Así mismo, autores han reportado tipos de falla característicos en la conexión S2F al término de los ensayos, entre los cuales se tiene el aplastamiento del panel de revestimiento provocado por la cabeza del conector [2,3,5]. Resulta necesario contar con innovaciones para prevenir este efecto, pues la conexión S2F es protagonista



del comportamiento global del muro y, asegurar su óptimo funcionamiento, conlleva a una menor degradación de rigidez y resistencia. Por otra parte, hallazgos que nacen de modelos analíticos pueden ser comprobados experimentalmente, tal es el caso del patrón de clavado optimizado propuesto por Estrella et al. [2].

### **Limitaciones de los procesos de revisión utilizados**

De forma general para ambas secciones, seleccionar ScienceDirect como única fuente de consulta y limitar la búsqueda a artículos indexados y revisados por pares puede mitigar algunas barreras en los procesos de revisión. Al utilizar una base de datos confiable y respetada en la comunidad académica, se reduce en gran medida el riesgo de sesgo de selección y se aumenta la probabilidad de encontrar estudios de alta calidad y relevancia. Los artículos revisados por pares suelen someterse a un riguroso proceso de evaluación por parte de expertos en el campo, lo que ayuda a garantizar la calidad y fiabilidad de la información presentada.

Además, al demarcar la búsqueda a artículos de investigación publicados en los últimos 10 años, se asegura que la revisión esté basada en la evidencia más actualizada y relevante disponible en la literatura científica. Esto permite capturar los avances más recientes en el campo y garantizar que los hallazgos y conclusiones discutidos sean pertinentes y aplicables en el contexto actual.

### **Con respecto a la sección: Estudios numéricos**

#### **Interpretación general de los resultados**

La investigación sobre muros de entramado ligero de madera aborda aspectos clave en el análisis y diseño estructural, con un enfoque en modelos numéricos avanzados y nuevas metodologías analíticas. En la primera división, los estudios revisados se centran en el desarrollo y validación de modelos numéricos de elementos finitos, mismos que los autores señalan como los más precisos, pero a la vez computacionalmente más demandantes [38,39,40,42]. De forma paralela sucede en la propuesta de modelos simplificados para representar el comportamiento estructural de los muros de madera [2,17]. Todos estos muestran una buena concordancia con los resultados experimentales y ofrecen una variedad de enfoques eficientes para analizar el comportamiento de los muros bajo diferentes condiciones de carga.

En la siguiente división se destacan innovaciones analíticas enfocadas en aspectos específicos del diseño estructural, como la evaluación de la capacidad de carga resistente [18], los efectos acumulativos en la deflexión total de los muros [7] y la integración de cargas verticales en el análisis sísmico [3]. Estos estudios ofrecen nuevas perspectivas sobre cómo mejorar la precisión y eficiencia en el diseño de muros de madera, así como la evaluación de su comportamiento bajo cargas sísmicas. En conjunto, estas secciones reflejan un progreso significativo en la comprensión y aplicación de técnicas avanzadas para el análisis y diseño de los muros en estudio.



## Limitaciones de la evidencia

Una de las limitaciones es la falta de validación experimental exhaustiva de los modelos propuestos. Pese a que varios estudios incluyen pruebas experimentales para comprobar sus enfoques [2,38,39,42], es necesario ampliarlas tomando en cuenta la implementación de materiales distintos a los ya ensayados, tanto para la madera del marco, como para el panel de revestimiento o el tipo de conector.

Además, se observa una tendencia hacia la simplificación de los modelos para reducir el esfuerzo computacional. Aunque es comprensible dada la complejidad de los modelos de análisis no lineal [38,39,40,42], estas simplificaciones pueden introducir cierto grado de incertidumbre en las predicciones, especialmente si no se evalúan cuidadosamente sus limitaciones y su impacto en los resultados finales. Asimismo, algunas suposiciones simplificadas, como la falta de consideración de la rigidez fuera del plano de los muros, pueden distorsionar la representación del comportamiento real de los muros de madera.

## Implicaciones de los resultados en la práctica, políticas e investigaciones futuras

En la práctica, los avances de modelado numérico ofrecen herramientas más precisas y eficientes para el diseño y análisis de estos muros [17,18,50]; mismas que pueden ser incorporadas dentro de *softwares* comerciales [2], pero también en aplicativos de código abierto como OpenSees. En términos de investigación futura, el efecto de la carga vertical sobre el comportamiento del muro ha sido un foco de interés encontrado en esta revisión. Esta es una condición ensayada de forma experimental por los autores y se relaciona al uso de este sistema estructural para edificaciones de mediana altura [2,3]. Extender una gran cantidad de pruebas experimentales a muros de varios niveles representa una gran demanda de recursos, en tanto que los modelos numéricos serán una alternativa para promover innovaciones en el análisis y diseño, particularizando los detalles a tomar en cuenta para cada nivel de piso.

## CONCLUSIÓN

Los análisis experimentales y numéricos realizados por los investigadores abordados en este estudio del estado del arte proporcionan avances significativos en la comprensión y mejora del comportamiento estructural de los muros de entramado ligero de madera. En la parte experimental se ha destacado la importancia de considerar cuidadosamente los detalles constructivos, la conexión S2F y la elección de materiales para mejorar el rendimiento sísmico y la durabilidad de estos muros. Por otro lado, los estudios numéricos han avanzado en el desarrollo de modelos precisos y eficientes para el análisis y diseño. Varios de los trabajos se complementan en ambas formas, puesto que los autores desarrollan las dos para validar los hallazgos encontrados. Sin embargo, no todos los detalles constructivos y condiciones de carga han sido explorados, por lo que representan una fuente para futuras investigaciones; particularmente el estudio de la conexión S2F, que es protagonista del comportamiento no lineal del muro ante carga lateral, producto de la acción sísmica. Las futuras investigaciones encaminadas a solventar aquellas limitaciones encontradas en la evidencia se darán de forma conjunta experimental y analíticamente con el fin de corroborar adecuadamente los resultados.



La información entregada en este artículo es una referencia útil para transmitir los avances logrados en otros países hacia aquellas regiones del mundo donde el sistema de entramado ligero de madera no ha sido mayormente divulgado.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Diego Quizanga y Luisa Viera realizaron la conceptualización; Jaime Encalada y Lenin Álvarez desarrollaron la metodología, el manejo de *software*, la investigación y la escritura del borrador original; Luisa Viera realizó la validación, revisión y edición del manuscrito final.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no declaran ningún conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- [1] Lam, F., Filiatrault, A., Kawai, N., Nakajima, S. y Yamaguchi, N. (2002). Performance of timber buildings under seismic load. Part 1: Experimental studies. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 276–285. doi: <https://doi.org/10.1002/pse.121>
- [2] Estrella, X., Guindos, P., Almazán, J. L. y Malek, S. (2020). Efficient nonlinear modeling of strong wood frame shear walls for mid-rise buildings. *Engineering Structures*, 215, 110670–110670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110670>
- [3] Orellana, P., Santa María, H., Almazán, J. L. y Estrella, X. (2021). Cyclic behavior of wood-frame shear walls with vertical load and bending moment for mid-rise timber buildings. *Engineering Structures*, 240, 112298–112298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112298>
- [4] Bagheri, M. M. y Doudak, G. (2020). Structural characteristics of light-frame wood shear walls with various construction detailing. *Engineering Structures*, 205, 110093–110093. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110093>
- [5] Guíñez, F., Santa María, H. y Almazán, J. L. (2019). Monotonic and cyclic behaviour of wood frame shear walls for mid-height timber buildings. *Engineering Structures*, 189, 100–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.043>
- [6] Lebeda, D. J., Gupta, R., Rosowsky, D. V. y Dolan, J. D. (2005). Effect of Hold-Down Misplacement on Strength and Stiffness of Wood Shear Walls. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 10(2), 79–87. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2005\)10:2\(79\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2005)10:2(79))
- [7] Bagheri, M. M. y Doudak, G. (2021). Experimental and numerical study on the deflection of multi-storey light-frame timber shear walls. *Engineering Structures*, 233, 111951–111951. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111951>
- [8] Salinas-Ríos, K. y Janneire García-López, A. (2022). Bibliometrics, a useful tool within the field of research Bibliometría, una herramienta útil dentro del campo de la investigación. *Journal of Basic and Applied Psychology Research Biannual Publication*, 3(6), 10–17. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/jbapr/issue/archive>
- [9] Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E. y Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62(7), 1382–1402. doi: <https://doi.org/10.1002/ASI.21525>
- [10] Yepes-Nuñez, J. J., Urrutia, G., Romero-García, M. y Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. doi: <https://doi.org/10.1016/j.RECESP.2021.06.016>
- [11] Saini, D. y Shafei, B. (2020). Damage assessment of wood frame shear walls subjected to lateral wind load and windborne debris impact. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 198, 104091–104091. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104091>
- [12] Alam, M. S., Barbosa, A. R., Mugabo, I., Cox, D. T., Park, H., Lee, D. y Shin, S. (2023). Elevated light-frame wood residential building physical and numerical modeling of damage due to hurricane overland surge and waves. *Engineering Structures*, 294, 116774–116774. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116774>
- [13] Schick, M. y Seim, W. (2019). Overstrength values for light frame timber wall elements based on reliability methods. *Engineering Structures*, 185, 230–242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.034>
- [14] Pan, Y., Ventura, C. E. y Tannert, T. (2020). Damage index fragility assessment of low-rise light-frame wood buildings under long duration subduction earthquakes. *Structural Safety*, 84, 101940–101940. doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.101940>
- [15] Inoue, R., Mori, T. y Matsumoto, S. (2023). Effect of numerous small deformations caused by moderate earthquakes on shear performance of wooden walls. *Construction and Building Materials*, 364, 130016–130016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130016>
- [16] Wakashima, Y., Ishikawa, K., Shimizu, H., Kitamori, A., Matsubara, D. y Tesfamariam, S. (2021). Dynamic and long-term performance of wood friction connectors for timber shear walls. *Engineering Structures*, 241, 112351–112351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112351>





- [17] Casagrande, D., Rossi, S., Sartori, T. y Tomasi, R. (2016). Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls. *Construction and Building Materials*, 102, 1101–1112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.114>
- [18] Caprolu, G., Girhammar, U. A. y Källsner, B. (2015). Comparison of models and tests on bottom rails in timber frame shear walls experiencing uplift. *Construction and Building Materials*, 94, 148–163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.125>
- [19] Anil, Ö., Togay, A., Karagöz İşleyen, Ü., Söğütü, C. y Döngel, N. (2016). Hysteretic behavior of timber framed shear wall with openings. *Construction and Building Materials*, 116, 203–215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.068>
- [20] Sadeghi Marzaleh, A., Nerbano, S., Sebastiani Croce, A. y Steiger, R. (2018). OSB sheathed light-frame timber shear walls with strong anchorage subjected to vertical load, bending moment, and monotonic lateral load. *Engineering Structures*, 173, 787–799. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.044>
- [21] Shadravan, S. y Ramseyer, C. C. (2018). Investigation of Wood Shear Walls Subjected to Lateral Load. *Structures*, 16, 82–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.08.007>
- [22] American Wood Council. (2015). *Special design provisions for wind and seismic*. American Wood Council.
- [23] Instituto Nacional de Normalización. (2009). *NCh 433. Of96: Diseño Sísmico de Edificios*. Norma Chilena Oficial.
- [24] Estrella, X., Malek, S., Almazán, J. L., Guindos, P. y Santa María, H. (2021). Experimental study of the effects of continuous rod hold-down anchorages on the cyclic response of wood frame shear walls. *Engineering Structures*, 230, 111641–111641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111641>
- [25] Qiang, R., Zhou, L., Ni, C. y Huang, D. (2022). Seismic performance of high-capacity light wood frame shear walls with three rows of nails. *Engineering Structures*, 268, 114767–114767. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114767>
- [26] American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM D 7987: Standard Practice for Demonstrating Equivalent In-Plane Lateral Seismic Performance to Wood-Frame Shear Walls Sheathed with Wood Structural Panels*. ATSM International.
- [27] Verdret, Y., Faye, C., Elachachi, S. M., Le Magorou, L. y García, P. (2015). Experimental investigation on stapled and nailed connections in light timber frame walls. *Construction and Building Materials*, 91, 260–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.052>
- [28] European Committee for Standardization. (2004). EN1995 Eurocode 5. *Design of timber structures*, 144(6).
- [29] American Society for Testing and Materials. (2008). *ASTM E 2126: Standard test method for cyclic load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for building*. American Society for Testing and Materials
- [30] Germano, F., Metelli, G. y Giuriani, E. (2015). Experimental results on the role of sheathing-to-frame and base connections of a European timber framed shear wall. *Construction and Building Materials*, 80, 315–328. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.076>
- [31] Zheng, W., Li, Y., Zhou, Y., Zhu, Y., Lu, W., Liu, W. y Wang, H. (2020). Experimental investigation on the behavior of plybamboo sheathing-to-framing screwed connections. *Construction and Building Materials*, 262, 120856–120856. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120856>
- [32] Echeverry, J. S. y Correal, J. F. (2015). Cyclic behavior of Laminated Guadua Mat sheathing-to-framing connections. *Construction and Building Materials*, 98, 69–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.109>
- [33] Folz, B., Filiatrault, A., Project, S. S. R. y University of California, S. Diego. D. of S. E. (2000). *CASHEW: A Computer Program for the Cyclic Analysis of Shear Walls*. Department of Structural Engineering, University of California. <https://books.google.com.ec/books?id=jv1DAQAIAAJ>
- [34] Nguyen, T. T., Dao, T. N., Aaleti, S., van de Lindt, J. W. y Fridley, K. J. (2018). Seismic assessment of a three-story wood building with an integrated CLT-lightframe system using RTHS. *Engineering Structures*, 167, 695–704. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.025>



- [35] Yue, K., Liang, B., Shao, Y., Xie, C., Hu, W., Zhao, M., Chen, Z. y Lu, W. (2021). Lateral behavior of wood frame shear walls sheathed with densified plywood under monotonic loading. *Thin-Walled Structures*, 166, 108082–108082. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108082>
- [36] Casagrande, D., Rossi, S., Tomasi, R. y Mischi, G. (2016). A predictive analytical model for the elasto-plastic behaviour of a light timber-frame shear-wall. *Construction and Building Materials*, 102, 1113–1126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.025>
- [37] Valdivieso, D., Guindos, P., Montaña, J. y Lopez-García, D. (2023). Experimental investigation of multi-layered strong wood-frame shear walls with nonstructural Type X gypsum wallboard layers under cyclic load. *Engineering Structures*, 282, 115797–115797. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115797>
- [38] Humbert, J., Boudaud, C., Baroth, J., Hameury, S. y Daudeville, L. (2014). Joints and wood shear walls modelling I: Constitutive law, experimental tests and FE model under quasi-static loading. *Engineering Structures*, 65, 52–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.047>
- [39] Boudaud, C., Humbert, J., Baroth, J., Hameury, S. y Daudeville, L. (2015). Joints and wood shear walls modelling II: Experimental tests and FE models under seismic loading. *Engineering Structures*, 101, 743–749. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.053>
- [40] Peng, C., El Damatty, A. A., Musa, A. y Hamada, A. (2020). Simplified numerical approach for the lateral load analysis of light-frame wood shear wall structures. *Engineering Structures*, 219, 110921–110921. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110921>
- [41] Folz, B. y Filiatrault, A. (2001). Cyclic Analysis of Wood Shear Walls. *Journal of Structural Engineering*, 127(4), 433–441. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:4\(433\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:4(433))
- [42] Kuai, L., Ormarsson, S. y Vessby, J. (2023). Nonlinear FE-analysis and testing of light-frame timber shear walls subjected to cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 362, 129646–129646. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129646>
- [43] Kuai, L., Ormarsson, S., Vessby, J. y Maharjan, R. (2022). A numerical and experimental investigation of non-linear deformation behaviours in light-frame timber walls. *Engineering Structures*, 252, 113599–113599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113599>
- [44] Dunton, A. y Gardoni, P. (2023). Physics-based probabilistic capacity models and fragility estimates for light wood frame shear walls. *Engineering Structures*, 285, 115966–115966. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115966>
- [45] Jensen, J. L., Caprolu, G. y Girhammar, U. A. (2016). Fracture Mechanics Models for Brittle Failure of Bottom Rails due to Uplift in Timber Frame Shear Walls. *Advances in Civil Engineering*, 2016. doi: <https://doi.org/10.1155/2016/9402650>
- [46] Caprolu, G., Girhammar, U. A. y Källsner, B. (2017). Analytical models for splitting capacity of bottom rails in partially anchored timber frame shear walls based on fracture mechanics. *Wood Material Science & Engineering*, 12(3), 165–188. doi: <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1075228>
- [47] Caprolu, G., Girhammar, U. A., Källsner, B. y Lidelöv, H. (2014). Splitting capacity of bottom rail in partially anchored timber frame shear walls with single-sided sheathing. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 7(2), 83–105. doi: <https://doi.org/10.1080/19373260.2014.898558>
- [48] Caprolu, G., Girhammar, U. A. y Källsner, B. (2015). Splitting capacity of bottom rails in partially anchored timber frame shear walls with double-sided sheathing. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 8(1), 1–23. doi: <https://doi.org/10.1080/19373260.2014.952607>
- [49] Estrella, X., Guindos, P., Almazán, J. L., Malek, S., Santa María, H., Montaña, J. y Berwart, S. (2021). Seismic performance factors for timber buildings with woodframe shear walls. *Engineering Structures*, 248, 113185–113185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113185>
- [50] Berwart, S., Estrella, X., Montaña, J., Santa-María, H., Almazán, J. L. y Guindos, P. (2022). A simplified approach to assess the technical prefeasibility of multistorey wood-frame buildings in high seismic zones. *Engineering Structures*, 257, 114035–114035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114035>

## Initial study on natural fibers for use in concrete mixes as a sustainable materials alternative

Josué D. Batallas<sup>1</sup>, Nicolás A. Hidalgo<sup>1</sup>, Mateo F. Montenegro<sup>1</sup>, Lourdes M. Orejuela-Escobar<sup>2,3</sup>, Francisco Játiva<sup>1,3</sup>, Eva O. L. Lantsoght<sup>1,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería Civil, Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Ingeniería Química, Politécnico, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

<sup>3</sup>Institute for Materials and Energy, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

<sup>4</sup>Concrete Structures, Department of Engineering Structures, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

\*Corresponding author, Eva O. L. Lantsoght: [elantsoght@usfq.edu.ec](mailto:elantsoght@usfq.edu.ec)

## Estudio inicial sobre fibras naturales para su uso en mezclas de hormigón como alternativa de materiales sostenibles

### Abstract

Natural fibers are becoming a key point for the development of new concrete mixes because these fibers are recovered from residual biomass. In this paper, we focus on the natural fibers found in the Metropolitan District of Quito, Ecuador. For this purpose, we searched for materials (fibers) available in the Chemical Engineering laboratory at Universidad San Francisco de Quito USFQ. In this paper, we analyze different literature on how the use of fibers influences the mechanical properties of concrete. Based on this analysis and the materials at the laboratory, we have developed recommendations on which natural fibers are of interest for further experimental research. Furthermore, this paper provides an understanding of how natural fibers influence the mechanical properties of concrete. It also proposes a process for the selection and study of any type of natural fiber for further replicability in mix analysis.

**Keywords:** circular bioeconomy, residues, cement reduction, sustainable construction

### Resumen

Las fibras naturales se están convirtiendo en un punto clave para el desarrollo de nuevas mezclas de hormigón porque estas fibras se obtienen a partir de biomasa residual. Este artículo está enfocado en las fibras naturales que se encuentran en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Para ello se buscaron materiales (fibras) disponibles en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. En este artículo se analiza diferente literatura sobre cómo el uso de fibras influye en las propiedades mecánicas del hormigón. Basándonos en este análisis y en los materiales del laboratorio, hemos desarrollado recomendaciones sobre qué fibras naturales son de interés para futuras investigaciones experimentales. Además, este artículo proporciona diferentes conceptos de cómo las fibras naturales influyen en las propiedades mecánicas del hormigón. Asimismo, se propone un proceso para la selección y estudio de cualquier tipo de fibra natural para su posterior replicabilidad en el análisis de la mezcla.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Domenica Aroca

Recibido /  
Received:  
18/11/2023

Aceptado /  
Accepted:  
26/02/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
12/03/2024



**Palabras clave:** bioeconomía circular, residuos, reducción de cemento, construcción sostenible

---

## INTRODUCTION

This paper focuses on the integration of natural fibers into concrete mixes as a means to reduce the environmental impact of concrete and promote sustainable development. The use of natural fibers aligns with the principles of the circular bioeconomy and offers advantages such as renewability. Our specific focus is on the Metropolitan District of Quito, where local bio-based materials, like industry residues, can be utilized to develop environmentally friendly concrete mixes.

The addition of natural fibers to concrete holds promises for sustainable construction practices. By leveraging the abundance of natural fibers available and processed in Quito, the region can adopt a localized approach to creating eco-friendly concrete mixes. Understanding how different natural fibers affect the mechanical properties of concrete, such as toughness (post-peak behavior), which relates to its strength towards compressive, tensile, and flexural phenomena, is essential for formulating effective and sustainable mixes.

Through a comprehensive analysis of the existing literature and a review of available natural fiber-based materials at USFQ, this paper aims to provide insights into how natural fibers influence the mechanical properties of concrete. This paper presents novelty in the fact that there are no other studies that address this topic from a sustainable perspective. The goal is to identify natural fibers with potential for further experimental research based on the available resources of the city of Quito. Additionally, the paper proposes a framework and a decision-making procedure that can be applied to other regions and cities, facilitating the selection of suitable local natural fibers for sustainable concrete construction.

## METHODOLOGY

An effective analysis of the literature was possible because of well-conducted research. We used Google Scholar and academic journal sites as our main search engines to find the papers related to our scope. Initially, we had some indications to narrow and facilitate our search. For instance, we were restricted to look for studies that used fibers from natural origin, not fibers obtained artificially. To clarify, we were able to find some studies which used steel fiber residues as a replacement for cement in a concrete mix. However, this type of fiber was deemed outside of our focus and thus ruled out, given that it had no natural origin since steel is a material not found in nature. Another condition was to concentrate on papers that chiefly increased the tensile strength of concrete. We accepted studies that in general were beneficial for the mechanical properties of concrete, but we wanted to mostly highlight the increase in tensile strength. With those instructions in mind, our most used search term was "natural fibers 'tensile strength' of concrete," and we were able to find the material that is described in this study. Furthermore, note that the keywords utilized included, but were not limited to, "natural



fibers”, “concrete”, “mechanical properties”, and “sustainability”. Moreover, it is important to highlight the timeframe we put into consideration. To keep the research as updated as possible, we decided to accept studies published roughly in the last 10 years. This was to work with recent investigations that reflect the current state of the industry in terms of intellectual development in this subject matter. The sole exception was a paper from 2004, but we acknowledged it as a worthy source of information to keep it.

Another crucial aspect of our research process involved a visit to the Chemical Engineering laboratory at USFQ, which we completed on 23 March 2023 at approximately 16:00. The primary purpose of our visit was to compile an inventory of the natural fibers readily available at USFQ and to gain more insight into the topic from experts in the field. We selected the USFQ laboratory due to our close collaboration with the Chemical Engineering department. This collaboration provided us with accessibility to data on the chemical characterization of materials, thereby easing the initial stages of our research for this paper. However, our choice of laboratory does not preclude us from exploring material availability in other laboratories as our investigation gains wider acceptance.

Additionally, we aimed to determine if the fibers used in the papers we found during our online research were already accessible at the laboratory. This step was crucial to minimize transportation contamination, aligning with the primary objective of our study, which is to prioritize sustainability. During our visit, we took pictures of the fibers available at the laboratory and summarized how we could connect the fibers identified in our online investigation with those at USFQ. This allowed us to effectively plan an emulation of the mixed preparations described in the papers.

## Literature review – Concrete mixes with natural fibers

The integration of natural fibers and natural fine materials into concrete mixes offers a promising solution for sustainable construction and reducing the impact of concrete production. By replacing a portion of cement with natural fine materials, the carbon footprint can be decreased while the novel mixes align with the principles of the circular bioeconomy by encouraging a lower use of cement. Cement production is an important source of CO<sub>2</sub> emissions and is estimated to contribute to 5-8% of the global CO<sub>2</sub> emissions [1]. This paper focuses on researching and cataloging insights on concrete mixes with natural fibers and natural fine materials, with a specific emphasis on materials available in Ecuador and in the city of Quito.

Moreover, the use of natural fibers could potentially improve mechanical properties of concrete mixes. As concrete is strong in compression but weak in tension, additional materials are necessary to provide tensile resistance. This resistance is traditionally provided by reinforcement bars, or recently by using steel fibers [2]. Nonetheless, natural fibers could be a promising solution to increase the tensile strength and post-peak ductility. The fibers could potentially help with crack control by reducing crack width and providing a better distribution of cracks. This contribution could also improve the fatigue life of the composite material. Ultimately, natural fibers may also provide additional fire resistance just like polypropylene fibers [3], which reduce the spalling of fire-exposed concrete as the fibers melt and the open space functions as a pressure relief valve for the pore pressure that builds up in the heated concrete.



Considering the availability and environmental impact of transportation, it is crucial to prioritize locally available natural fibers in Quito. An inventory conducted at the Chemical Engineering laboratory of USFQ revealed several natural fibers and fine materials studied previously in Quito. These materials are either naturally available in Quito, processed in the industry of the city, or brought from other parts of the country. Fibers such as African palm rachis, banana rachis, and rice husk, among others, were identified as potential candidates for sustainable concrete mixes. Moreover, as these natural fibers have been used in other projects at USFQ, the chemical composition and properties are available and known. Additionally, other fibers like abaca, curaua, sisal, jute, ramie, and linen have been studied by other researchers in Quito, and these materials were identified as good candidates for use in bio-based materials [4].

### Research results – Influence of natural fibers on mechanical properties

The use of natural fibers in concrete mixes represents a recent advance, with limited experiments reported in the literature. In this study, we have concentrated on references investigating the mechanical properties in comparison to a reference concrete mix without fibers.

This section discusses the different natural mixes that were analyzed. We divided the fibers into two categories: the first, fibers that were turned into ash (pozzolanic materials), and the second, fibers used in natural state. For the first category, there was a focus on rice husk ash (RHA) in conjunction with olive waste ash (OWA) [5]. Furthermore, another study suggested that RHA could be blended with seashell ash (SSA) and bamboo fiber (BF) to enhance the tensile strength of hardened concrete [6]. For the second category, a novel concrete-like material was introduced: kenaf fiber-reinforced geopolymer concrete (KFRGC) [7]. Similarly, other studies found that jute fiber (JF) enhanced concrete tensile strength [8]. Additionally, there were suggestions that spikelet (SPF) and stalk (STF) fibers that come from oil palm empty fruit bunch fiber (OPEFB) can increase the properties of cement mortar [9]. One local reference regarding the influence of natural fibers on mechanical properties was identified. Specifically, a local study in Ecuador investigated the use of African oil palm rachis and coconut bast [10]. Below, the findings of each experiment are shown in Table 1.

**TABLE 1.** Fibers used and analyzed in each study

Experiment	Type of fiber	Materials used	Increment in tensile strength	Proportion of fibers in the mix
Hakeem et al. (2022)	Pozzolanic materials	Rice husk ash (RHA), olive waste ash (OWA)	41.33%	20% of cement volume replaced with RHA and an additional 5% with OWA
Wahyuni et al. (2014)	Pozzolanic materials	RHA and seashell ash (SSA)	2% to 6%	Replacement of 30% by weight of original fine aggregates
Noor Abbas et al. (2023)	Natural state	Kenaf fiber-reinforced geopolymer concrete (KFRGC)	20% to 27%	Incorporating 1.25% volume fraction of 30 mm long kenaf fiber, low calcium fly ash (60% of total binder), and GGBS (40% of total binder)



Experiment	Type of fiber	Materials used	Increment in tensile strength	Proportion of fibers in the mix
Gulzar et al. (2023)	Natural state	Jute fiber (JF), superplasticizer (SP), ground granulated blast furnace slag (GGBS)	27%	0.5% by volume of JF, addition of SP, and 25% by volume of GGBS
Rama Rao & Ramakrishna (2021)	Natural state	Spikelet (SPF) and stalk (STF) fibers that come from oil palm empty fruit bunch fiber (OPEFB)	65% to 126% with SPF and 7.5% to 60% with STF	Replace 2% of cement mass with 15 mm-long SPF or replace 3% of cement mass with 20 mm-long STF
Caizaguano & Terán (2020)	Natural state	African oil palm rachis (AOPR) and coconut bast (CB)	3.67% with AOPR and 0.71% with CB	2% of AOPR or 2% of CB in the mix

An important aspect to consider is that the characteristics of the fibers are already studied in each article. For instance, some of the aspects provided are diameter, density, tensile strength (of the fiber alone), Young’s modulus, specific gravity, and water absorption capacity. These characteristics are clearly outlined in order to get an overview of each fiber and predict a certain behavior when mixed with concrete. Furthermore, some articles also explore ground natural products through XRD and EDX analyses to determine their chemical composition relative to cementitious materials commonly used in traditional concrete mixes like fly ash.

### Research results – Available natural fibers in Quito

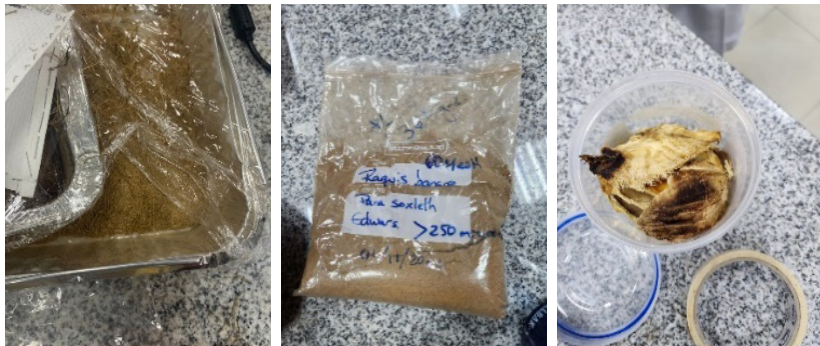
To find a sustainable mix design for concrete incorporating natural fibers and ash sourced from local, environmentally friendly sources, it is essential to consider products that are readily accessible within the region. The practice of importing materials from distant coastal areas is not deemed environmentally friendly, primarily due to the associated carbon footprint resulting from transportation via fossil fuel-consuming trucks. Fortunately, Ecuador’s relatively compact geographical size mitigates this concern, as the short travel distances involved in transporting fibers have a minimal impact. Nevertheless, in a concerted effort to further reduce the carbon footprint, an inventory was conducted at USFQ as previously described. With the help of Professor Lourdes Orejuela, who oversees the laboratory, we started analyzing and classifying the fibers. The professor explained to us the process that the fibers underwent in the lab. The objective was to comprehensively identify natural fibers readily available with minimal transportation requirements. These fibers were subsequently categorized into three groups: available natural fibers, accessible bio-based aggregates, and obtainable ash products suitable for use as cementitious materials.





The focus for this research was on materials already available at USFQ in the Chemical Engineering laboratory, as initial material characterization was already carried out. As such, input parameters necessary for working with these materials in concrete mixes are available or can be obtained easily through collaboration between the departments of Chemical and Civil Engineering.

The locally available fibers that could be used in concrete mixes to explore the influence on the mechanical properties are: African palm rachis, banana rachis, mango endocarp, brewer's spent grain (BSG), rice husk, and cacao pod husk. These are shown in Figures 1 and 2.



**FIGURE 1.** African palm rachis, banana rachis, mango endocarp (left to right)



**FIGURE 2.** BSG, rice husk, cacao pod husk (left to right)

Potential bio-based aggregates locally available are quinoa residue, banana biochar, rose plantation residue, and hydrochar made from mango endocarp, rice husk, blackberry residue, moringa peel, and cacao pod. For instance, these raw materials can be of great use for nanocellulose which produces so-called smart materials [11]. In turn, nanocellulose can be implemented in concrete mixes for improved physical and mechanical properties as well as self-healing abilities. In terms of bio-based ash products that can be used as a supplementary cementitious material, rice husk can be



used to make rice husk ash. The materials available at USFQ at the moment of doing the inventory are shown in Figure 3.



**FIGURE 3.** Banana biochar, rose plantation residue, mango endocarp hydrochar (left to right)

As can be noted, some of these available fibers have a connection with the literature review presented, and some of the fibers in the inventory are new in relation to the contents of the review. Therefore, as of now, we will select two fibers to elaborate on as they present the greatest potential for future investigation at USFQ. Specifically, we will select rice husk with the use of Hakeem et al. and Wahyuni et al. as references for mixing, and African palm rachis with Caizaguano and Terán as a guidance on the trial mix design.

Specifically, RHA should be prepared at a target temperature of 600 °C that should be reached at a rate of 10 °C/min and then maintained for 2 hours. Then, the RHA should be cooled at 1.67 °C/min with an additional cooling in air at room temperature for 35 min. Lastly, a screening of the RHA is to be performed with a 75 µm sieve before mixing with concrete [5]. It is important that the material is stored in airtight bags for storage purposes. To complement the previous guidance, the water binder ratio should be kept at 0.45, and the slump value should equal approximately 6 to 10 cm [6].

On the other hand, the methodology for preparing African palm rachis involves a chemical treatment. Specifically, the treatment is based on a water solution mixed with 10 g of lime hydroxide per liter of water. The fibers should be placed inside the solution for 48 hours, then washed with clean water and checked to see if the water comes out clear. If it does not, the process should be repeated as many times as needed until the water comes out clear. Afterwards, these fibers are cut at a length of 38 mm to then be placed in the concrete mix [10].

The other natural fibers available at USFQ are not discarded from this study and represent a good starting point for new, locally relevant research that will broaden the perspective of materials about which information in literature can be found. For these materials, additional characterization of the fiber properties may be necessary as a basis for the research.

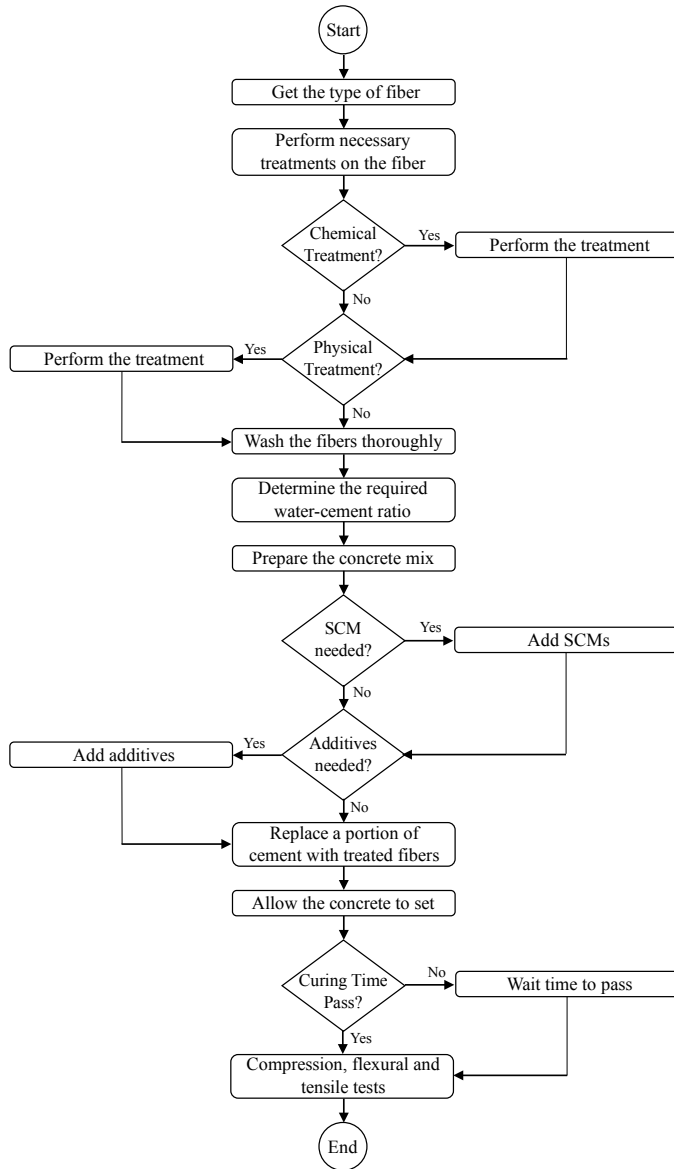


## Recommendations for fiber selection

The experience presented in this paper can serve as a basis for other cities and regions where there may be an interest in locally developing concrete mixes with natural fibers and products as part of the transition to the circular economy. From our pilot study, we can give the following recommendations as a framework for those who may want to apply our strategy:

- Prioritize locally available natural fibers to support the concept of the circular economy and reduce carbon emissions associated with transportation.
- Prioritize fibers that result from existing industries, like banana rachis residues from local snack producers, and give preference to natural fibers with low embodied energy, renewable sourcing, biodegradability, and potential for waste valorization to minimize the carbon footprint of concrete and promote sustainability.
- Assess fiber characteristics by evaluating the physical and mechanical properties of natural fibers, such as length, diameter, strength, elasticity, moisture content, absorption, and degradation in an alkaline environment to ensure their suitability for concrete mixes.
- Evaluate the fiber performance in concrete by examining the influence of natural fibers on the concrete's mechanical properties, including compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, flexural strength, and durability at various points in time.
- Obtain experimental data and compare theoretical insights to better understand how different fibers perform in concrete mixes.
- Assess the practicality of sourcing and incorporating selected natural fibers in large-scale concrete production, considering their availability and cost. Evaluate their compatibility with existing supply chains in the local construction industry.

A flowchart showing the recommended steps to follow in order to prepare every type of fiber mix is shown in Figure 4. This flowchart can help researchers who are identifying available natural fibers in their location and help with the decision-making on the exploration of the natural fibers in concrete mixes. In addition, the flowchart provides the various steps that are relevant in the process of developing a mix design in which natural fibers are used to both improve the mechanical properties and replace the fine materials (cement) for a more sustainable alternative.



**FIGURE 4.** Concrete mixing with fibers flowchart

As explained previously, this flowchart indicates a general process for the implementation of natural fibers in concrete mixes so that the result is efficient and synonymous to that of the studies presented in this article. It is evident that each paper presented in the research results section is different in its own way, but it is possible to summarize their procedures in a flowchart such as the one in Figure 4. The flowchart starts with the obtention of the fiber in the most efficient and sustainable way, preferably if the



fiber is available locally before importing it. This aligns with the study's aim to be as environmentally friendly as possible. Then, for every paper, the fibers are treated either in a chemical or physical manner to prepare them before including them in the mix. For instance, some fibers are placed in a lime hydroxide solution [10], which would indicate a chemical treatment. On the contrary, other fibers are cut to a determined length [8], which implies a physical treatment. Some papers include both a chemical and a physical treatment, and the chemical treatment usually comes first. Then, the general mix design is carried out by considering the water-cement ratio and whether supplementary cementitious materials (SCM) are needed according to each paper. After that comes a crucial step, which is the replacement of a percentage of cement, either by volume or by weight, with the natural fiber to be used. The replacement must be done in the percentage that each paper indicates because each fiber behaves differently and needs more or less quantity to achieve the expected results. Lastly, the appropriate tests must be conducted to evaluate the mechanical performance of the mix which should yield results nearly similar to those of the papers studied.

## DISCUSSION

This paper shows the first work on developing concrete mixes using natural fibers to improve the mechanical properties of the resulting composite material and to reduce the carbon footprint by replacing part of the fine materials with natural products that may be byproducts of other industrial activities. As natural fibers are a renewable resource, the use of these materials also contributes to the shift to a circular bio-based economy.

As a first step, identifying potentially interesting materials needs to be carried out. This paper reports an initial study on natural fibers and identifies the available materials locally in Quito that could be of interest to serve as fibers in concrete mixes and to partially replace the fraction of fine materials (cement) in the mix. Then, the paper provides considerations for researchers who would want to use natural fibers available in their city, and practical guidance on working towards a mixed design with natural fibers that can be tested in the laboratory.

Indeed, testing these mixes in the laboratory is a necessary step and precisely the next step in this research. We will focus first on the use of natural fibers to provide crack bridging and improve the post-peak ductility of concrete beams tested in displacement-controlled conditions. Various natural fibers will be studied, such as rice husk and African palm rachis, which are readily available at USFQ and for which we have guidance papers as a starting point, and they will be compared to traditional polypropylene fibers for reference, as well as to a reference concrete mix without fibers.

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

This study focuses on incorporating natural fibers into concrete mixes in Quito to create sustainable alternatives for the local construction industry. By prioritizing local, bio-based materials, the aim is to reduce the carbon footprint and support the circular economy. This research examines the impact of natural fibers on concrete's mechanical



properties based on literature. Concrete mixes that have been studied in the literature and that have resulted in improved properties as compared to the reference mix include biomaterials such as rice husk ash, olive waste ash, seashell ash, bamboo fiber, kenaf fiber-reinforced geopolymer concrete, and jute fiber. In these cases, fibers are both used for mechanical properties and ground to a fine material to replace part of the cement.

The study's inventory of natural fibers at USFQ identifies readily available materials like African palm rachis, banana rachis, mango endocarp, and rice husk for concrete production. Experience with these materials is available in the Chemical Engineering laboratory so that in collaboration with Civil Engineering, the necessary properties for concrete mixes can be obtained.

Overall, the study emphasizes the potential of natural fibers to develop sustainable concrete mixes in Quito and beyond. By considering fiber availability, characteristics, and environmental benefits, stakeholders can make informed decisions to reduce the environmental impact of concrete and promote eco-friendlier construction practices that are aligned with the transition to a circular economy. Experimental research is necessary for the application of these mixes, and a flowchart on mix design is included to guide researchers who are working with fibers available in their country and city with the selection of the materials and procedures necessary in the laboratory. These procedures focus on working both with the fresh concrete (concrete mix) and the hardened concrete (for determination of the mechanical properties).

Ultimately, there is a need for a shift from single-use natural resources that cannot be replaced to renewable natural resources. This need drives changes in the construction industry and in the way concrete mixes will be designed in the future.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by the EU Horizon 2020 RISE program and the USFQ Poligrants of Industry Outreach, supported by Holcim.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Josué Batallas, Nicolás Hidalgo, and Mateo Montenegro performed research on existing literature, compiled the inventory of available fibers at USFQ, and wrote this article; Lourdes Orjuela-Escobar contributed with insight on the chemical knowledge for the preparation of fibers and provided the materials presented in the pictures; Francisco Játiva collaborated with reviews and comments for the refinement of this article; Eva Lantsoght led the investigation and provided multiple revisions and comments prior to the publication of this article.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest.



## REFERENCES

- [1] He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M. & Wang, Y. (2019). Comparison of CO<sub>2</sub> emissions from OPC and Recycled Cement Production. *Construction and Building Materials*, 211, 965–973. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
- [2] Lantsoght, E. O. L. (2019). How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? *Composites Part B: Engineering*, 175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107079>
- [3] Bilodeau, A., Kodur, V. K. R. & Hoff, G. C. (2004). Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites*, 26(2), 163-174. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00085-4)
- [4] Guerrero, V., Dávila, J., Galeas, S., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V. & Valdivieso, C. (2011). *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales*. Escuela Politécnica Nacional.
- [5] Hakeem, I. Y., Agwa, I. S., Tayeh, B. A. & Abd-Elrahman, M. H. (2022). Effect of using a combination of rice husk and olive waste ashes on high-strength concrete properties. *Case Studies in Construction Materials*, 17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01486>
- [6] Wahyuni, A. S., Supriani, F., Elhusna & Gunawan, A. (2014). The performance of concrete with rice husk ash, sea shell ash and bamboo fibre addition. *Procedia Engineering*, 95, 473–478. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.207>
- [7] Noor Abbas, A.-G., Nora Aznieta Abdul Aziz, F., Abdan, K., Azline Mohd Nasir, N. & Fahim Huseien, G. (2023). Experimental evaluation and statistical modeling of kenaf fiber-reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130228>
- [8] Gulzar, M. A., Ali, B., Barakat, O., Azab, M., Najemalden, A. M., Salih Mohammed, A. & Alashker, Y. (2023). Influence of jute fiber on tensile, electrical, and permeability characteristics of slag concrete: A better, cheaper, and eco-friendly substitute for conventional concrete. *Journal of Natural Fibers*, 20(1). doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2170947>
- [9] Rama Rao, P. & Ramakrishna, G. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of oil palm empty fruit bunch fiber reinforced cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 46, 471–477. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.269>
- [10] Caizaguano, Ó. & Terán, G. (2020). *Caracterización del hormigón con fibras naturales del raquis de la palma africana de aceite y la estopa del coco* [Thesis]. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21247>
- [11] Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C. & Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular Bioeconomy, Zero Waste Technology, Environment and Sustainable Development: The Nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2), 83–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.004>

## Los indicadores de desempeño de la distribución urbana de mercancías: Un análisis bibliométrico

Alejandro Molina<sup>1\*</sup>, Cristian Gómez<sup>1</sup>, Conrado Serna<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Metropolitano, Departamento de Calidad y Producción, Medellín, Colombia

Autor de correspondencia: [alejandromolina244949@correo.itm.edu.co](mailto:alejandromolina244949@correo.itm.edu.co)

## Performance Indicators for Urban Goods Distribution: A Bibliometric Analysis

### Abstract

This paper presents a systematic literature review of Urban Freight Transport (UFT) in last mile logistics, using the PRISMA methodology, and a bibliometric analysis based on statistical assessments of both quality and quantity. The search was conducted in Web of Science and Scopus databases. The authors identified a growing interest from researchers across various countries and the adoption of technological approaches to address this critical aspect of the supply chain. This detailed analysis revealed a multifaceted landscape of UFT, highlighting the diversity of performance indicators assessed in the reviewed studies. These indicators have allowed the identification of key factors influencing goods delivery in urban settings and their interaction with diverse variables, assessed through a variety of evaluation methods. As a result, a classification taxonomy encompassing ten types of indicators, organized into sub-indicators based on their nature and focus, is proposed. In summary, this study provides a comprehensive overview of the current literature on Urban Goods Distribution (UFT) and presents a groundwork for future research. Additionally, it offers guidance for addressing challenges in last-mile logistics. These findings have the potential to influence decision-making and policy design in the field of urban logistics, thereby contributing to the advancement of knowledge and efficiency in this crucial area of modern logistics.

**Key words:** Urban logistics, Urban Distribution, Indicators, Performance Factors

### Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura sobre Distribución Urbana de Mercancías (DUM) en logística de última milla, utilizando la metodología PRISMA y un análisis bibliométrico basado en análisis estadísticos de calidad y cantidad. La búsqueda se realizó en las bases de datos Web of Science y Scopus. Los autores identificaron un creciente interés de investigadores de diversos países y la adopción de enfoques tecnológicos para abordar este aspecto crucial de la cadena de suministro. Este análisis detallado reveló un panorama multifacético de la DUM, destacando la diversidad de indicadores de desempeño evaluados en los estudios revisados. Estos indicadores han permitido identificar factores clave que influyen en la entrega de mercancías en entornos urbanos y su interacción con variables diversas, evaluadas mediante una variedad de métodos de evaluación. Como resultado, se propone una taxonomía de clasificación que abarca diez tipos de indicadores, organizados en subindicadores según su naturaleza y enfoque. En resumen, este estudio ofrece una visión integral de la



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



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

Recibido /  
Received:  
18/01/2024

Aceptado /  
Accepted:  
23/02/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
23/05/2024



literatura actual sobre DUM y presenta una base para futuras investigaciones. Además, proporciona orientación para abordar los desafíos en la logística de última milla. Estos hallazgos tienen el potencial de influir en la toma de decisiones y el diseño de políticas en el ámbito de la logística urbana, contribuyendo así al avance del conocimiento y la eficiencia en esta área crucial de la logística moderna.

**Palabras clave:** logística urbana, distribución urbana, indicadores, factores de desempeño

---

## INTRODUCCIÓN

La demanda de entregas en la última milla ha experimentado un notable incremento en el mercado actual, generando desafíos significativos en términos económicos y ambientales [1,2]. El comercio en línea ha sido uno de los grandes impulsores de este incremento, lo que ha resultado en una mayor frecuencia y flexibilidad de los envíos y entregas a pequeña escala. El aumento en la frecuencia de envíos produce un crecimiento en el número de viajes realizados por vehículos medianos y pequeños en el transporte de carga urbano [3], generando ineficiencias en las entregas de última milla [4]. Además, conlleva problemas de congestión vial, impacto ambiental y costos elevados de transporte [5].

En Estados Unidos, este aumento en la actividad de transporte ha suscitado preocupaciones económicas y medio ambientales entre las que se encuentran el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 24%, situando al sector como el principal contribuyente a las emisiones en comparación con otros sectores [6], y, además, el elevado costo del transporte en la última milla dentro de la cadena de suministro [7,8]. Este panorama ha motivado la necesidad de abordar el impacto ambiental asociado [9], las externalidades negativas generadas por el movimiento de mercancías en entornos urbanos, y aliviar la congestión vehicular en estas áreas [10], que mejoren la eficiencia en las operaciones de transporte considerando las partes interesadas involucradas y la importancia de abordar estos desafíos en términos de ciudades sostenibles e inteligentes.

En este contexto, se ha resaltado la relevancia de explorar alternativas de transporte, como el uso de drones, vehículos eléctricos y bicicletas, lo que ha dado lugar a un enfoque multimodal en la Distribución Urbana de Mercancías (DUM) [11,12]. Sin embargo, con este enfoque no es suficiente lograr la reducción del impacto ambiental y económico, ya que también es importante que las ciudades cuenten con la infraestructura adecuada para que se pueda brindar un buen servicio en términos de calidad, además de contar con el apoyo indispensable de los entes gubernamentales para que propicien estas condiciones. En este sentido, el presente estudio busca indagar sobre los factores que están involucrados en la DUM y los métodos de evaluación de estos, a partir de los tipos de problemas abordados en la logística de última milla.

Actualmente, existe una brecha en la literatura con respecto a la evaluación de indicadores para medir y optimizar la DUM desde perspectivas económicas y ambientales. Esta brecha cobra mayor relevancia debido al crecimiento exponencial en la demanda de productos a través de plataformas digitales [13]. El aumento de la demanda enfoca la atención en la necesidad de asegurar que el crecimiento económico no comprometa la calidad de vida en





las ciudades, evitando un mayor consumo energético derivado de las operaciones logísticas y, por ende, un impacto ambiental más significativo. Por esta razón, este estudio busca proporcionar una visión completa y objetiva de los indicadores de desempeño abordados y empleados en el último eslabón de la cadena productiva, como lo es la logística de última milla. Además, explora diversas alternativas para abordar y evaluar estos indicadores.

El documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta la introducción, en la sección 2 se expone la metodología seguida en el artículo, el análisis bibliométrico se muestra en la sección 3, junto con los resultados de la revisión sistemática de la literatura. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Una revisión de la literatura eficiente implica consultar diferentes fuentes de información de manera rigurosa y seguir unas etapas que permitan identificar contribuciones en el área de estudio [14]. Además de que construye conocimiento de manera confiable, la revisión sistemática de la literatura crea una base firme para progresar en el conocimiento y hacer más fácil el desarrollo de la teoría [15].

En este estudio, se adoptó la metodología PRISMA, siguiendo un enfoque similar al presentado por Moher et al. [16]. Esta metodología cuenta con una serie de etapas que permiten rastrear la información necesaria de manera eficiente y precisa con relación a las preguntas de investigación que fundamentan la revisión sistemática. Las preguntas de investigación (P.I) en este estudio son:

- P.I. 1)** ¿Cuáles son los principales indicadores de desempeño utilizados en el estudio y análisis de la logística de última milla y DUM?
- P.I. 2)** ¿Qué métodos se han utilizado para medir y evaluar estos indicadores de desempeño?

Para dar respuesta a estas preguntas se realizó la revisión sistemática de la literatura, en la cual se empleó una estrategia de búsqueda con una ecuación que contenía palabras clave relevantes. Esta búsqueda se limitó temporalmente desde el año 2013 hasta junio de 2023. La ecuación utilizada fue la siguiente: (“city logistic” OR “last mile” OR “urban freight transport” OR “outbound logistics”) AND (“performance measure” OR goal OR objective) AND (simulation OR optimization OR simuling OR optimizing)). Esta ecuación se consultó en las bases de datos Scopus y Web of Science. Los resultados encontrados en Scopus fueron 346 documentos y en Web of Science 175 documentos. En la figura 1 se presenta el flujograma relacionado al proceso de rastreo bibliográfico.

En el proceso de búsqueda, se aplicaron criterios de inclusión rigurosos, empleando un análisis bibliométrico basado en cualificar y cuantificar los datos, los cuales permitieron identificar problemas relacionados con la DUM, considerando diversas modalidades de transporte de carga. Como primer criterio, se eligieron artículos que abordaban la logística urbana de mercancías, transporte de mercancías y logística de última milla en general. En segundo lugar, se tomaron en cuenta trabajos que abordaron problemas de



distribución, localización, asignación, entre otros. Por último, se eligieron artículos que trataron principalmente temáticas de simulación y optimización, ya que la probabilidad de encontrar indicadores medibles era mayor en estos. Se excluyeron investigaciones relacionadas con desastres naturales y logística humanitaria, investigaciones que abordaron redes de distribución en el contexto de telecomunicaciones, el diseño de redes de conectividad de internet. Por su parte, también el transporte de pasajeros y de eslabones distintos a la última milla en la cadena de suministro, como lo son el almacenamiento y la producción o, problemas de localización de instalaciones empresariales y distribución de mercancías en áreas no urbanas. Se seleccionaron 129 documentos que cumplieron con los criterios de inclusión, mientras que 232 fueron excluidos.

## RESULTADOS

Los resultados de la investigación se dividen en dos partes. La primera se relaciona con los hallazgos que se derivan del análisis bibliométrico, basado en el total de registros obtenidos directamente de las bases de datos. La segunda implica la revisión sistemática de la literatura, utilizando los registros seleccionados. En la figura 1, se pueden observar las diferentes etapas de esta investigación. En la etapa de Identificación surgieron los resultados del análisis bibliométrico. Las etapas subsiguientes de Filtración, Idoneidad e Inclusión corresponden a la revisión sistemática de la literatura, durante la cual se identificaron y clasificaron los indicadores de desempeño en la DUM.

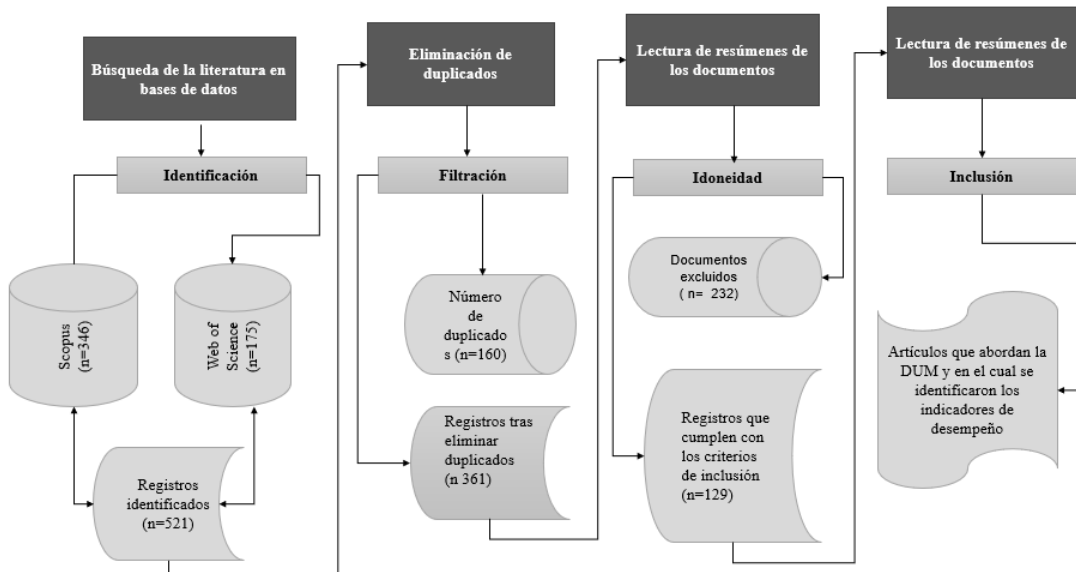


Figura 1. Diagrama de flujo metodología de la revisión sistemática de literatura



## Producción sobre la DUM y sus indicadores de desempeño

En el número de publicaciones por año, se muestra una tendencia creciente sobre las publicaciones en logística de última milla y los indicadores de desempeño. En la figura 2, se puede observar el comportamiento de las publicaciones durante 10 años de registros bibliométricos.

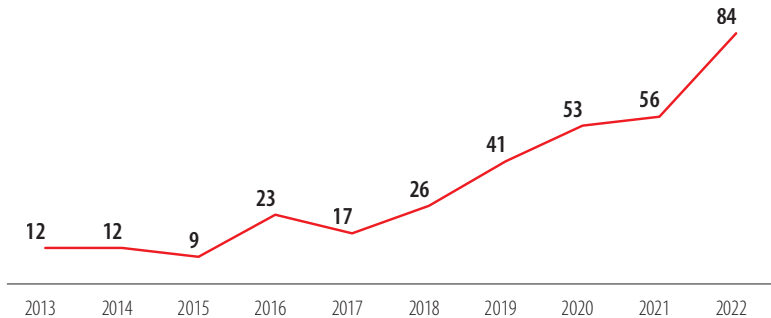


Figura 2. Representa el comportamiento anual de las publicaciones durante los diez años observados.

Se observa una tendencia constante de crecimiento a partir de 2018. Además, en 2019 se registra un aumento significativo en comparación con años anteriores. El incremento se mantiene hasta 2022, siendo este último año el más alto en publicaciones en relación con el anterior, con un aumento de 28 publicaciones en comparación con los 361 artículos revisados en la investigación. En este sentido, *Transportation Research Procedia* y *Sustainability (Switzerland)* destacan como las dos revistas con más de 10 publicaciones en comparación con otras. En cuanto al análisis de calidad, estas revistas han tenido el mayor número de citas, con 459 y 409 respectivamente como se ve en la figura 3. Las 15 revistas más citadas representan aproximadamente el 50% del total de citas, lo que evidencia la influencia que tienen estas revistas en las publicaciones sobre Distribución Urbana de Mercancías (DUM) y logística de última milla.

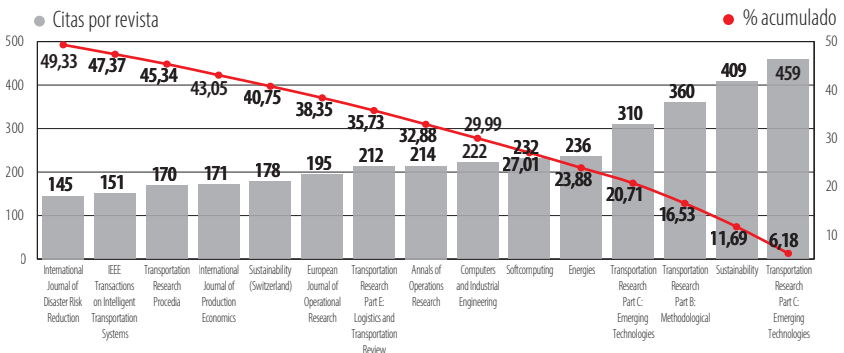


Figura 3. Citas por revista



## Red de coautoría

Un total de 589 autores participaron en las publicaciones sobre indicadores en la DUM, de los cuales un solo autor publicó 7 veces, dos autores 4 veces, 11 autores 3 veces, 33 autores dos veces y 542 solo hicieron una publicación. La figura 4 representa la red de coautoría en las diferentes investigaciones. Cabe destacar que el autor que presentó más colaboración con otros autores es Wang Yinhai, colaborando con 11 autores diferentes. Otros de los autores que presentaron una colaboración conjunta y productiva con otros autores fueron Liu Dan y Kaisar Evangelos I., con 10 publicaciones en colaboración cada uno respectivamente.

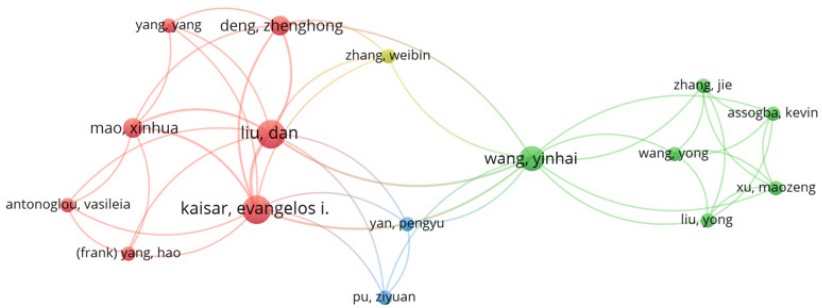


Figura 4. Visualización de la red de coautoría

## Red de coocurrencia

El análisis de clústeres revela distintas temáticas abordadas en el contexto de la DUM y la logística de última milla. El clúster amarillo se enfoca en la logística de transporte urbano, con énfasis en la planificación de rutas, enrutamiento de vehículos y operaciones de flotas. El clúster rojo se centra en la optimización de procesos y modelización de sistemas, incluyendo aspectos como ventanas de tiempo, optimización y desarrollo sostenible. En el clúster azul se destacan palabras relacionadas con la optimización y algoritmos, como la satisfacción del cliente, optimización multiobjetivo y algoritmos genéticos. Finalmente, el clúster verde aborda temas de comercio electrónico y última milla, incluyendo aspectos como el uso de drones, simulación y calidad de servicio en las entregas. Este análisis sirvió para agrupar palabras frecuentes en los datos bibliográficos encontrados. Se distinguieron patrones o características compartidas entre las palabras, formando así temáticas importantes en la investigación. Como herramienta de análisis se utilizó el *software* VOSviewer.

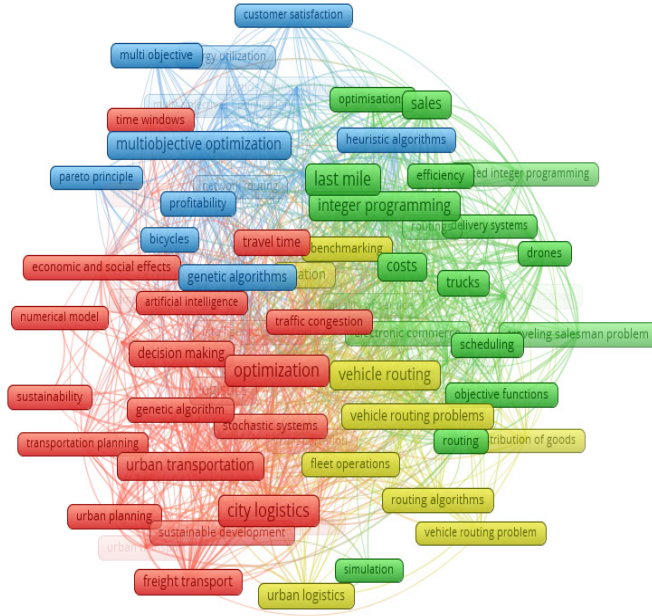


Figura 5. Palabras claves del conjunto de documentos revisados

### Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño fueron asociados a una categorización basada en el análisis de la literatura. Esta categorización se puede observar en la figura 6, con la frecuencia de utilización del indicador en los diferentes documentos. Cada categoría fue conformada por un conjunto de indicadores y clasificados de acuerdo con el contexto de uso y el tipo de solución.

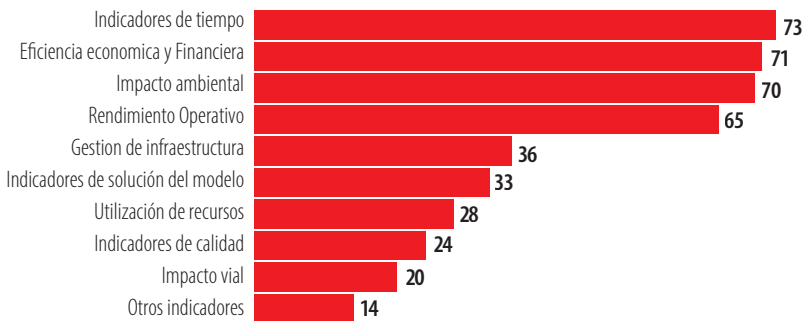


Figura 6. Categoría de indicadores



## Indicadores de tiempo

En logística de última milla, los indicadores clave para evaluar la eficiencia temporal son el Tiempo de Viaje, que cuantifica el tiempo de desplazamiento vehicular [17], y la Duración de Entrega, representando el tiempo total de operaciones [18]. Por su parte Le Colleter et al. [19], trabajó el tiempo de entrega repartidores que realizan la entrega caminando.

Se ha abordado la duración total de todas las operaciones de entrega y tareas relacionadas desde el inicio hasta la finalización (*makespan*) [20,21]. Los ahorros en el *makespan* evalúan mejoras al introducir operaciones alternativas [22,23]. El Tiempo de Entrega indica el tiempo que toma entregar un paquete desde el centro de consolidación hasta el destino final [24] y la Latencia Total [25], representa el tiempo total necesario para completar todos los pedidos desde su liberación hasta su entrega. Adicionalmente, existe el Tiempo de Transporte Actual [26], que significa el tiempo real requerido para llevar a cabo el proceso de transporte, incluyendo el tiempo de viaje y posibles retrasos.

## Indicadores de tiempo de espera

En este tipo de indicadores de hallaron factores como el Tiempo de Espera, que es el tiempo que se pasa aguardando para entregar las mercancías dentro de las ventanas de tiempo especificadas [27]. También se refiere al tiempo que la carga debe esperar para ser recogida. Se utilizó este concepto como el tiempo que un vehículo debe esperar en cada parada durante la realización de tareas como carga, descarga, interacción con clientes y otras operaciones [28]. Asimismo, el tiempo de espera fue utilizado en la preparación y recogida de pedidos como lo hacen recogida [29]. Por su parte recogida Salama y Srinivas [20] trabajaron el Tiempo de Hovering de Vehículos, como el tiempo que los vehículos pasan en espera antes de que se les asigne una tarea específica. Por último, se identificó el Retraso Total en la Entrega para medir la cantidad total de tiempo que cada cliente debe esperar más allá de sus ventanas de tiempo de entrega especificadas para recibir sus productos [22,30].

## Impacto ambiental

Estos indicadores incluyen métricas como la sostenibilidad ambiental, que se refiere a la capacidad de reducir el impacto ambiental de la cadena de suministro y el buen uso de los recursos naturales, y la adopción de prácticas sostenibles en las operaciones logísticas y productivas [31]. También se enfocan en la emisión de contaminantes atmosféricos, como gases de escape de vehículos, que afectan la calidad del aire y la salud pública en áreas urbanas [13].

Algunos autores que trabajaron este tipo de indicadores [32] destacaron la Sostenibilidad Ambiental como la capacidad de reducir el impacto ambiental y adoptar prácticas sostenibles. Propusieron el Porcentaje de Emisiones de Carbono respecto a la Carga Total ( $CO_2/TC$ ) para evaluar la intensidad de carbono en operaciones de distribución [33]. Además, dieron un enfoque en la Emisión de  $CO_2$ , representada por la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como resultado de las actividades de transporte [3,34,35].



En cuanto al impacto ambiental y la sostenibilidad energética, se midió el Consumo de Combustible, como la cantidad consumida de combustible durante el proceso de transporte [36]. También se analizó la Eficiencia Energética de los vehículos de reparto medida como el consumo de energía de los vehículos eléctricos y la capacidad de sus baterías [37]. Se evaluó el Impacto en el Uso del Suelo derivado de las operaciones en la DUM [38]. Además, se contribuyó con la Reducción del Ruido en entregas urbanas para un entorno más silencioso [31].

Finalmente, se ofrecieron perspectivas valiosas en la comparación de combustible entre Diesel y gas licuado de petróleo (GLP), lo cual genera la comprensión de la sostenibilidad desde la perspectiva del tipo de combustible utilizado [3].

### **Impacto económico**

En el análisis de indicadores relacionados con el impacto económico en la DUM, se distinguen los siguientes acercamientos. Se abordan los costos económicos vinculados directamente con la adquisición y operación de vehículos de distribución, abarcando aspectos como la compra, el mantenimiento y los costos energéticos [39]. Se focalizaron los elementos fijos asociados con la operación de vehículos de distribución denominado (Costo Fijo de los Vehículos (FC)) [33]. A su vez, se contribuyó con el Costo Operativo Promedio, evaluando los gastos promedio para operar vehículos autónomos en entregas urbanas [40].

Entre los costos asociados a la ruta, los indicadores utilizados fueron: el costo por entrega (CPD), como un indicador esencial para evaluar los costos asociados con la entrega de pedidos [29]. Se aportó con el *Travel Cost*, que calcula el costo total de viaje de todos los vehículos en el servicio de entrega [41]. Por otro lado, se evaluó el costo global vinculado con el enrutamiento de vehículos mediante el Costo Total de Ruta [19].

Como indicadores financieros, se propone el uso del KPI Financiero (*Key Performance Indicator*), basado en datos financieros de transportistas [42]. Se examinaron los ingresos (*revenue*) generados por el servicio de distribución urbana, considerando la entrega de paquetes [43]. Se trabajó las ganancias como un índice de rentabilidad [44] y se usaron métricas clave como la Relación Beneficio-Costo (BCR) y el Valor Presente Neto (VPN) [32], evaluando la viabilidad económica de proyectos logísticos urbanos. En esta misma dirección, se evalúa la rentabilidad del sistema de transporte de carga en áreas urbanas [39,40] y el Costo Total del Sistema Promedio como un indicador integral que considera los costos totales en la distribución urbana.

### **Eficiencia operativa y rendimiento operacional**

En la DUM, diversos indicadores han sido identificados para evaluar la eficiencia y rendimiento de las operaciones logísticas. Se ha resaltado la importancia de la distancia total recorrida por todos los vehículos para completar entregas [30]. Así como se consideró la distancia recorrida durante la operación, medida durante el consumo de combustible [45]. Por otro lado, se subrayó la influencia de la densidad de la ruta en la eficiencia de la planificación de la misma, calculada como la proporción entre el tiempo de viaje y el tiempo de carga y descarga [46]. Se definió la distancia de viaje como la distancia total recorrida para realizar entregas [29].



En términos de eficiencia operativa, se resaltó la importancia de la eficiencia en tareas como el ensamblaje y la preparación de pedidos en las operaciones de última milla [47]. Se describió la programación eficiente de tareas como la optimización de la secuencia y horario de tareas en cada parada del camión, incluyendo la gestión de vehículos y la interacción con los clientes [20]. Se abordó la eficiencia en el movimiento de los vehículos durante las operaciones, evaluando la velocidad promedio y su variabilidad [17].

En cuanto al rendimiento, se trabajó un indicador que evalúa la velocidad real en comparación con la velocidad planificada, midiendo la eficiencia en el transporte durante las operaciones [26]. Se investigó cómo la variación de la relación de velocidad afecta indicadores de desempeño, como los costos totales de entrega [48]. Se definió la velocidad de los vehículos en las entregas como la velocidad a la que el vehículo se desplaza durante su entrega [25].

### **Impacto vial**

En el contexto del impacto vial, se propuso la Tasa de Accidentes para medir la frecuencia y severidad de accidentes relacionados con el transporte de carga, contribuyendo a mejorar la seguridad vial [35]. Se introdujo el Riesgo de Seguridad al Transportar Valores, evaluando el riesgo asociado al transportar cargas valiosas en rutas [49]. Se midió el Gradient\_Longitudinal (LG), que se refiere a la pendiente de carreteras urbanas, crucial para influir en la velocidad de conducción, costos de transporte y seguridad [50]. Se presentó la Tasa de Participación de Incidentes, centrada en minimizar incidentes relacionados con el transporte de carga para mejorar la seguridad en las operaciones [8].

En cuanto a la congestión vehicular, se evalúa el Tráfico Congestionado y Emisiones de CO<sub>2</sub>, enfocándose en el impacto ambiental de la congestión vehicular en operaciones de última milla y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas [51]. Se trató el Impacto en la Congestión del Tráfico, utilizando datos sobre la velocidad del tráfico y variaciones para entender cómo el transporte de carga afecta la congestión del tráfico [52]. Se midió la Congestión del Tráfico mediante la frecuencia y duración de embotellamientos, evaluando cómo afecta la eficiencia de la última milla y la logística en general [53]. Se abordó el Número Promedio de Vehículos Estacionados Ilegalmente, midiendo el impacto del estacionamiento ilegal en la congestión vehicular [54]. Se introdujo el Alivio de la Congestión del Tráfico (TAR), cuantificando la reducción de la congestión causada por el transporte de carga [55]. Finalmente, se consideró la Eficiencia de Tráfico, centrándose en mejorar el flujo de tráfico en la ciudad para reducir tiempos de viaje y emisiones [56].

### **Gestión de infraestructura**

En la gestión de infraestructura, el indicador Tasa de Ocupación fue utilizado para evaluar la eficiencia y uso de áreas de entrega o instalaciones logísticas urbanas [57]. También se aplicó para estimar la utilización de la infraestructura de carreteras por parte de vehículos de carga, traduciéndola en unidades equivalentes de automóviles de pasajeros (PCU) [8].

Se utilizó la Disponibilidad de Infraestructura para evaluar la capacidad y facilidad con la que se utilizan los recursos necesarios para operaciones en la red logística [58]. Por otra





parte, se midió la necesidad de recursos para respaldar eficientemente las operaciones logísticas y de transporte, incluyendo lugares de entrega, rotación de vehículos y áreas de estacionamiento bajo el indicador Demanda de Infraestructura de Transporte de Mercancías [8], que se refiere la necesidad de recursos para respaldar eficientemente las operaciones logísticas y de transporte, incluyendo lugares de entrega, rotación de vehículos y áreas de estacionamiento.

En la infraestructura para vehículos eléctricos, se introdujo el indicador de Infraestructura de Carga para Vehículos Eléctricos (EFV), centrándose en la disponibilidad y distribución de puntos de carga [11]. También, se resaltó la importancia de evaluar la Disponibilidad de la Infraestructura de Carga, crucial para determinar la viabilidad de la operación de vehículos eléctricos modulares [59]. Además, se cuantificó el número de estaciones de vehículos para evaluar la cantidad de ubicaciones donde pueden operar los vehículos [48].

### Utilización de los recursos

Para evaluar la gestión de la utilización de los recursos se han utilizado algunos indicadores, entre ellos el concepto de Vehículo Equivalente [60], que compara el número de vehículos que utilizan los subcontratistas que operan de manera tradicional y aquellos que adoptan enfoques sostenibles. Esta métrica se calcula al convertir unidades de transporte, como bicicletas a furgonetas, y se determina como la suma del tiempo de trabajo de cada ciclista, dividido por las horas de trabajo de un subcontratista tradicional en un turno completo.

Los mismos autores utilizan la minimización del Número Total de Trabajadores y Vehículos, que busca optimizar las operaciones de última milla al reducir el número total de trabajadores y vehículos necesarios para realizar entregas a los clientes. Por otro lado, la Tasa de Uso Compartido de Vehículos (ST Rate) [61], se refiere a la tasa de recorridos en los que un vehículo tiene una ubicación de partida diferente de la de llegada, indicando que se completó mediante el uso compartido de flota. Este indicador evalúa el nivel de uso compartido de flotas y cómo varía en diferentes escenarios.

El Balanceo de Ruta indica la distribución justa de la carga de trabajo de los empleados entre vehículos en operaciones de entrega, optimizando rutas y tareas para prevenir fatiga y agotamiento [9]. Por otro lado, se evaluó la posibilidad de reducción de la carga de trabajo de los conductores, lo cual permite la realización de entregas simultáneas y la paralelización de tareas [62].

### Otros

En el análisis de la DUM, se destacaron indicadores clave como la Densidad de Población [17], que ofrece perspectivas sobre la concentración urbana. Las Relaciones Comerciales [63] influyen en la colaboración efectiva en la cadena de suministro evaluada a través de factores como confianza, lealtad, oportunismo, estética de la información y alianzas corporativas.

El OEE (Overall Equipment Effectiveness) [26] mide la eficacia de los sistemas de transporte. Además, el Impacto en la Salud Pública (DALYs) [38] evalúa las repercusiones ambientales y de salud por la exposición a emisiones de transporte.



## Indicadores de calidad

La evaluación de las operaciones en la DUM involucró indicadores fundamentales relacionados con la calidad del servicio y su impacto ambiental. Para medir la capacidad de satisfacer la demanda de los clientes y puntos de recogida se usó el indicador Cobertura de Clientes [31,64]. El Factor de Carga (calidad), fue propuesto para medir la proporción de pedidos entregados dentro de las ventanas de tiempo especificadas en comparación con el total de pedidos entregados [26,45]. La Satisfacción de la Demanda, que cuantifica la diferencia entre la demanda de pedidos y la capacidad de los vehículos, así como la experiencia del cliente, donde se midió la satisfacción general del cliente con el servicio de entrega, considerando factores como el tiempo de entrega, la puntualidad y la calidad de los productos entregados son abordados por Paul y Doreswamy [29].

En términos de calidad ambiental, la Calidad de Vida examina cómo las operaciones de transporte afectan la calidad de vida de los ciudadanos, considerando aspectos como la contaminación del aire, el ruido, la seguridad vial y la experiencia de los visitantes en zonas antiguas de las ciudades [9]. El Objetivo de Nivel de Servicio, contribuyó a mejorar la calidad de vida al reducir la contaminación y mejorar la eficiencia logística [65].

## Indicadores de solución del modelo y eficiencia computacional

La calidad de las soluciones de los modelos orientados a solucionar problemas de la DUM se evalúa mediante diversos indicadores. La Desviación Porcentual [66] propuesto para calcular la diferencia porcentual entre los valores obtenidos en soluciones robustas y determinísticas, ofrece una evaluación de la robustez y calidad bajo diferentes niveles de incertidumbre y tamaños de problemas. El Hypervolume Indicator (HV) [67], mide la precisión y diversidad de las soluciones generadas por algoritmos, indicando la eficacia en la generación de soluciones de alta calidad.

Además, los indicadores de rendimiento y eficiencia computacional son cruciales. El *Throughput*, medido en mensajes por milisegundo [68], indica la capacidad del sistema para procesar y transmitir información de forma eficiente. Otros indicadores incluyen el Tiempo de Ejecución de la Heurística para medir la eficiencia computacional [69,70,71], el Número de Mejores Soluciones Encontradas para evaluar la capacidad del algoritmo en comparación con otros métodos [72], la Desviación Porcentual Relativa (RPD) para cuantificar la precisión de las soluciones, el Promedio de Desviaciones Porcentuales Relativas (ARPD) para resumir el rendimiento promedio a lo largo de instancias de prueba [2] y el Tiempo de Cálculo para evaluar el tiempo necesario para resolver cada instancia del problema.

## Métodos empleados en la literatura para medir y evaluar los Indicadores de Desempeño en la DUM

### Métodos de aproximación (heurísticas y metaheurísticas)

En la literatura se encuentran diversos métodos metaheurísticos y heurísticos como enfoques computacionales para resolver problemas de optimización y búsqueda. Estos métodos son estrategias generales diseñadas para guiar la exploración eficiente del espacio de soluciones en problemas complejos. En el contexto logístico, se han identificado y utilizado varios de estos métodos, cada uno adaptándose a diferentes desafíos y contextos específicos.



## Heurísticos

Entre los métodos identificados, se encuentran el algoritmo de Búsqueda Local y de Vecindad Grande (LNS) para el PLRP-PS [19], el algoritmo SBPI para problemas MDP, el algoritmo VLSN para problemas de gran escala [66], el Recocido Simulado (SA) y Variable Búsqueda de vecindario Variable (VNS) [20], el *Tabu Search* (TS) con el enfoque Búsqueda tabú Multi-Punto (MSTS) [73], el algoritmo de Operador de Inserción para servicios dinámicos de compartición de viajes [74], el algoritmo de Agrupamiento para asignación eficiente de vehículos [41], y el Esperar y Regresar (WR y WI) para la toma de decisiones en tiempo activo de solicitudes [75].

## Metaheurísticas

Las metaheurísticas como estrategias de optimización en espacios complejos, ofrecen flexibilidad y eficiencia para solucionar problemas en el contexto logístico. Entre este tipo se encontraron en la revisión sistemática las siguientes: algoritmo HY-NSGA-II K. [76] y HY-NSGA-II [77]. Se destacan por su enfoque evolutivo multiobjetivo Los algoritmos genéticos, inspirados en la evolución biológica [35,36,65]. Por otro lado, los Algoritmos Inmunológicos (IA) e Inmunológico Híbrido (HIA) incorporan conceptos de inmunidad y enfermedades epidémicas [2].

La Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) modela partículas virtuales para buscar soluciones óptimas [3,55]. La Optimización Heurística (*Black Hole*) se inspira en agujeros negros para adaptarse y optimizar soluciones. Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO), basada en el comportamiento de hormigas, guía la búsqueda de rutas óptimas [37]. La Optimización Híbrida Basada en Biogeografía (HBBO) combina elementos de biogeografía y optimización para resolver problemas específicos [64].

Por último, las estrategias de optimización logística incluyen la Optimización Multiobjetivo, que busca soluciones óptimas bajo múltiples criterios [78].

## Exactos

El Modelo Multinomial Logit (MNL) se aplica a elecciones discretas con varias opciones, como el método de entrega [79]. Las Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP) modelan cambios en funciones con respecto a múltiples variables [80]. La Programación Estocástica aborda decisiones bajo incertidumbre, centrándose en la variabilidad de datos como la demanda o costos [81]. En la Optimización Combinatoria se buscan las mejores combinaciones de elementos o alternativas [82], mientras que la Programación Lineal Entera Mixta (MILP) utiliza variables enteras y continuas para resolver problemas complejos [67]. La Optimización Estocástica (*Sample Average Approximation - SAA*) aborda la incertidumbre en preferencias y decisiones [44].

## Experimentación

En la experimentación, se recurre a diversas técnicas de simulación. Los Modelos de Elección Discreta (DCMs) analizan preferencias mediante encuestas [83]. La Simulación Dinámica observa la evolución de sistemas complejos en el tiempo [57,83]. El Modelo



MARS de la Universidad de Tecnología de Viena aborda interacciones en entornos metropolitanos [84]. La Simulación por Autómatas Celulares modela actividades de agentes [85]. La Simulación de Eventos Discretos es útil para sistemas con eventos en momentos específicos [54]. Finalmente, la Simulación Microscópica considera interacciones individuales, especialmente en la dinámica del tráfico [56].

La tabla 1 presenta una estructurada clasificación de los indicadores del 1 al 18, proporcionando una visión integral de los resultados de la investigación. Las columnas de la tabla se componen de 4 elementos cruciales: los indicadores enumerados como se indicó, los autores que abordaron los indicadores, el tipo de problema planteado y los métodos particulares de solución.

**Tabla 1.** Clasificación de los indicadores de desempeño

Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución	Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución
1, 14	Tamke y Buscher, 2021 [62]	Ruteo	Exacto	1, 4, 7, 18	Raj y Murray, 2020 [71]	Ruteo	Aproximación
1, 17, 18	Schermer et al., 2019 [22]	Ruteo	Exacto	1, 6	Salama y Srinivas, 2022 [20]	Múltiple objetivo	Aproximación
1, 18	Yu et al., 2022 [75]	Ruteo	Aproximación	1, 6	K. Wang et al., 2020 [76]	Ruteo	Aproximación
1, 2	Zeng et al., 2020 [86]	Ruteo	Aproximación	1, 6, 16	Ko et al., 2019 [24]	Otros	Aproximación
1, 2, 3, 18	Trott et al., 2021 [19]	Múltiple objetivo	Exacto	1, 6, 17	Ratnagiri et al., 2022 [41]	Múltiple objetivo	Aproximación
1, 2, 3, 8, 9	Resat, 2020 [27]	Diseño de red	Exacto	1, 6, 17	Ensaflan et al 2023 [5]	Ruteo	Exacto
1, 2, 6, 18	Le Colleter et al., 2023 [19]	Ruteo	Aproximación	1, 6, 7, 9, 12	Bozkaya et al., 2017 [40]	Ruteo	Exacto
1, 2, 6, 8, 10, 12, 15	Miquel et al., 2019 [77]	Ruteo	Aproximación	1, 6, 8, 14, 17, 18	Chu et al., 2023 [82]	Ruteo	Aproximación
1, 2, 8, 11	Moufad et al., 2019 [57]	Gestión de flotas	Experimentación	1, 7, 17, 18, 18	Baudel et al., 2016 [52]	Ruteo	Aproximación
1, 2, 8, 14	Salama y Srinivas, 2020 [87]	Múltiple objetivo	Exacto	1, 8, 10, 13	Iwan y Malecki, 2017 [90]	Gestión de flotas	Experimentación
1, 3, 4, 5, 7	Muñoz-Villamizar et al., 2019 [39]	Gestión de flotas	Exacto	1, 9	De Oliveira Mota, 2021 [21]	Asignación	Aproximación
1, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13	Thaller et al., 2017 [84]	Gestión de flotas	Experimentación	1, 5, 6, 18	Borghetti et al., 2022 [79]	Diseño de red	Exacto
1, 3, 5, 6, 18	Tan et al., 2019 [33]	Ruteo	Aproximación	10, 11, 12, 18	Ezquerro et al., 2020 [54]	Múltiple objetivo	Experimentación
1, 3, 6	Yeomans, 2021 [88]	Ruteo	Aproximación	14, 6	Gaudron et al., 2020 [42]	Distribución	Experimentación
1, 3, 6, 12, 15	Rezgui et al., 2019 [59]	Asignación	Aproximación	2, 6, 7, 14, 18	Fehn et al., 2023 [43]	Otros	Experimentación
1, 4, 5, 6, 18	Betti Sorbelli et al., 2022 [37]	Múltiple objetivo	Aproximación	2, 6, 7, 17	Paul y Doreswamy, 2021 [29]	Ruteo	Experimentación
1, 4, 6	Pelletier et al (2019) [89]	Ruteo	Exacto	2, 6, 7, 8, 12, 18	Haripriya et al., 2022 [66]	Ruteo	Aproximación

1. Indicadores de Tiempo de viaje y eficiencia; 2. Indicadores de Tiempo de Espera; 3. Indicadores de Emisiones y Contaminantes; 4. Indicadores de Impacto Ambiental y Sostenibilidad Energética; 5. Costos Económicos; 6. Costo de Ruta y Financieros; 7. Eficiencia de Desplazamiento; 8. Eficiencia Operativa; 9. Indicadores de seguridad; 10. Indicadores de Congestión Vehicular; 11. Tasa de Ocupación; 12. Disponibilidad de la Infraestructura; 13. Uso de recursos humanos y de vehículos; 14. Balanceo de ruta; 15. Otros indicadores; 16. Calidad del Servicio de Entrega; 17. Impacto en la Calidad de Vida y Medio Ambiente; 19. Indicadores de rendimiento y eficiencia computacional



Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución	Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución
2, 7	Wang et al., 2023 [30]	Ruteo	Aproximación	3, 8, 9, 17, 18	Aloui Hamaniy y Delahoche, 2021 [35]	Diseño de red	Aproximación
2, 8, 12, 17	Muñoz-Villamizar et al., 2019 [26]	Múltiple objetivo	Exacto	4, 6, 8, 17	Chen y Wang, 2020 [70]	Ruteo	Aproximación
2, 8, 16, 18	Ehmke y Campbell, 2014 [46]	Ruteo	Exacto	4, 7, 14	Stinson et al., 2019 [95]	Gestión de flotas	Experimentación
3, 4, 5, 6, 18	Olapiriyakul y Nguyen, 2019 [38]	Diseño de red	Exacto	4, 8, 14, 16	Sacramento et al., 2019 [25]	Ruteo	Aproximación
3, 4, 6	Vishwanath et al., 2014 [91]	Otros	Exacto	4, 8, 17	Gruzauskas et al., 2023 [31]	Múltiple objetivo	Experimentación
3, 4, 7, 14, 18	Kunnappadeelert et al., 2022 [3]	Ruteo	Aproximación	5, 7, 10, 14, 16, 18	Crainic et al., 2016 [81]	Diseño de red	Probabilístico
3, 4, 8, 14, 18	Akkad y Bányai, 2020 [36]	Múltiple objetivo	Aproximación	5, 7, 14, 18	de Grancy, 2015 [96]	Ruteo	Aproximación
3, 5, 6, 8	Bányai, 2020 [92]	Múltiple objetivo	Aproximación	6, 10, 11	Hu et al., 2020 [55]	Localización	Exacto
3, 5, 6, 13, 17	Wang et al., 2017 [21]	Múltiple objetivo	Exacto	6, 16	Sawik et al., 2022 [51]	Localización	Exacto
3, 6	Validi et al., 2020 [93]	Múltiple objetivo	Exacto	6, 16, 11	Hiremath et al., 2013 [58]	Diseño de red	Aproximación
3, 6	Li et al., 2021 [65]	Múltiple objetivo	Aproximación	6, 7, 14, 17	Lu et al., 2022 [40]	Múltiple objetivo	Experimentación
3, 6, 10	Anderluh et al., 2021 [94]	Ruteo	Aproximación	6, 7, 16, 18	C. Wang et al., 2021 [48]	Múltiple objetivo	Probabilístico
3, 6, 16	Liu et al., 2021a [2]	Múltiple objetivo	Aproximación	6, 7, 18	Ren et al., 2021 [97]	Múltiple objetivo	Aproximación
3, 6, 18	Woody et al., 2022 [6]	Gestión de flotas	Exacto	6, 7, 8, 15, 18	Li et al., 2022 [67]	Ruteo	Exacto
3, 7	González-Varona et al., 2020 [7]	Ruteo	Experimentación	6.	Xia et al., 2021 [61]	Ruteo	Exacto
3, 8, 14	Perboli y Rosano, 2019 [60]	Gestión de flotas	Experimentación	7, 14, 15, 18	Luo et al., 2021 [73]	Ruteo	Aproximación

1. Indicadores de Tiempo de viaje y eficiencia, 2. Indicadores de Tiempo de Espera; 3. Indicadores de Emisiones y Contaminantes; 4. Indicadores de Impacto Ambiental y Sostenibilidad Energética; 5. Costos Económicos; 6. Costo de Ruta y Financieros; 7. Eficiencia de Desplazamiento; 8. Eficiencia Operativa; 9. Indicadores de seguridad; 10. Indicadores de Congestión Vehicular; 11. Tasa de Ocupación; 12. Disponibilidad de la Infraestructura; 13. Uso de recursos humanos y de vehículos; 14. Balanceo de ruta; 15. Otros indicadores; 16. Calidad del Servicio de Entrega; 17. Impacto en la Calidad de Vida y Medio Ambiente; 19. Indicadores de rendimiento y eficiencia computacional



Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución	Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución
7, 18	Arbabi et al., 2021 [98]	Ruteo	Aproximación	1, 2, 3, 8, 9	Resat, 2020 [27]	Diseño de red	Exacto
3, 4, 5, 6, 18	Olapiriyakul y Nguyen, 2019 [38]	Diseño de red	Exacto	3, 6, 18	Woody et al., 2022 [6]	Gestión de flotas	Exacto
1, 17, 18	Schermer et al., 2019 [22]	Ruteo	Exacto	1, 18	Yu et al., 2022 [75]	Ruteo	Aproximación
7, 18	Liu et al., 2021b [99]	Ruteo	Exacto	10, 11, 12, 18	Ezquerro et al., 2020 [54]	Múltiple objetivo	Experimentación
19	Y. Lin et al., 2022 [4]	Localización	Aproximación	1, 7, 17, 18, 18	Baudel et al., 2016 [52]	Ruteo	Aproximación
1, 14	Tamke y Buscher, 2021 [62]	Ruteo	Exacto	1, 6, 7, 9, 12	Bozkaya et al., 2017 [40]	Ruteo	Exacto
1, 6, 17	Ensañan et al. 2023 [5]	Ruteo	Exacto	1, 3, 6, 12, 15	Rezgui et al., 2019 [59]	Asignación	Aproximación
1, 4, 7, 18	Raj y Murray, 2020 [71]	Ruteo	Aproximación	19	Jiang et al., 2019 [34]	Ruteo	Aproximación
1, 5, 18	Dang et al., 2022 [100]	Ruteo	Aproximación	3, 4, 8, 14, 18	Akkad y Bányai, 2020 [36]	Múltiple objetivo	Aproximación
1, 5, 18	Nguyen et al., 2022 [72]	Ruteo	Exacto	3, 6	Li et al., 2021 [65]	Múltiple objetivo	Aproximación
6	Xia et al., 2021 [61]	Ruteo	Exacto	1, 3, 6	Yeomans, 2021 [88]	Ruteo	Aproximación
3, 5, 6, 13, 17	Wang et al., 2017 [21]	Múltiple objetivo	Exacto	3, 8, 9, 17, 18	Aloui Hamani y Delahoche, 2021 [35]	Diseño de red	Aproximación
3, 6, 16	Liu et al., 2021a [2]	Múltiple objetivo	Aproximación	4, 6, 8, 17	Chen y Wang, 2020 [70]	Ruteo	Aproximación
2, 10,	Mohamed et al., 2020 [101]	Diseño de red	Simulación	19, 12	Yuan et al., 2021 [103]	Ruteo	Aproximación
1, 4, 6	Pelletier et al (2019) [89]	Ruteo	Exacto	6, 13, 18	Amiri y Farvaresh, 2023 [104]	Gestión de flotas	Exacto
8, 18	Xu et al., 2022 [102]	Múltiple objetivo	Aproximación				

1. Indicadores de Tiempo de viaje y eficiencia; 2. Indicadores de Tiempo de Espera; 3. Indicadores de Emisiones y Contaminantes; 4. Indicadores de Impacto Ambiental y Sostenibilidad Energética; 5. Costos Económicos; 6. Costo de Ruta y Financieros; 7. Eficiencia de Desplazamiento; 8. Eficiencia Operativa; 9. Indicadores de seguridad; 10. Indicadores de Congestión Vehicular; 11. Tasa de Ocupación; 12. Disponibilidad de la Infraestructura; 13. Uso de recursos humanos y de vehículos; 14. Balanceo de ruta; 15. Otros indicadores; 16. Calidad del Servicio de Entrega; 17. Impacto en la Calidad de Vida y Medio Ambiente; 19. Indicadores de rendimiento y eficiencia computacional



## CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico de la literatura sobre los indicadores de desempeño de logística de última milla y la DUM, revela un crecimiento significativo en la investigación, con un aumento e interés por el tema cada vez mayor. La colaboración científica es notable y refleja la superioridad que existe entre los países que predominan el campo de investigación. El análisis de clústeres señala áreas clave, como logística y entregas, diseño y optimización, y transporte por carretera. En esta revisión sistemática de la literatura se puede observar una amplia variedad de indicadores que destacan la complejidad de las operaciones de la DUM, evidenciando la interconexión y relevancia de estos factores. La combinación de indicadores detallados y métodos avanzados de evaluación subraya la importancia crítica de medir estas métricas para lograr la adaptabilidad y optimización necesarias en la logística moderna. La diversidad de enfoques resalta la imperativa necesidad de soluciones personalizadas para afrontar de manera efectiva los desafíos específicos en la cadena de suministro y distribución.

El vertiginoso avance tecnológico, especialmente en campos como la inteligencia artificial, vehículos autónomos y análisis de datos, resalta la imperativa necesidad de adaptarse de manera continua a estas tendencias. La incorporación efectiva de estas tecnologías emergentes no solo puede revolucionar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones logísticas, sino que tiene el potencial de transformar radicalmente la calidad de vida en entornos urbanos. A través de un enfoque transformador, las condiciones de habitabilidad en las ciudades pueden mejorar significativamente, ofreciendo soluciones innovadoras que optimicen la movilidad, reduzcan la congestión y minimicen los impactos ambientales. Este cambio hacia entornos urbanos más habitables se basa en la capacidad de la tecnología para proporcionar soluciones inteligentes y sostenibles que no solo optimizan la logística, sino que también influyen positivamente en la experiencia diaria de los residentes urbanos.

En última instancia, se destacan algunas posibilidades para investigaciones futuras basadas en la discusión sobre los diferentes componentes de cada uno de estos indicadores y cómo podrían capturar datos de manera eficiente, con el fin de realizar cálculos para conjuntos de indicadores que utilicen componentes similares o que puedan extrapolarse de acuerdo con la medición de varios componentes.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al programa Jóvenes Investigadores del Instituto Metropolitano de Medellín por el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Cristian Gómez y Conrado Serna concibieron la investigación. Alejandro Molina y Cristian Gómez desarrollaron la metodología, realizaron el trabajo metodológico, la búsqueda





bibliográfica, el respectivo análisis bibliométrico y redactaron el manuscrito. Cristian Gómez revisó críticamente el contenido intelectual del manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación a la publicación de este artículo.



## REFERENCIAS

- [1] De Assis, T. F., De Abreu, V. H. S., Da Costa, M. G. y D'Agosto, M. de A. (2022). Methodology for prioritizing best practices applied to the sustainable last mile—The case of a Brazilian parcel delivery service company. *Sustainability*, 14(7), 3812. doi: <https://doi.org/10.3390/su14073812>
- [2] Liu, D., Deng, Z., Zhang, W., Wang, Y. y Kaisar, E. I. (2021). Design of sustainable urban electronic grocery distribution network. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 145–157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.051>
- [3] Kunnappadeelert, S., Johnson, J. V. y Phalitnonkiat, P. (2022). Green last-mile route planning for efficient e-commerce distribution. *Engineering Management in Production and Services*, 14(1), 1–12. doi: <https://doi.org/10.2478/emj-2022-0001>
- [4] Lin, Y., Wang, Y., Lee, L. H. y Chew, E. P. (2022). Profit-maximizing parcel locker location problem under threshold Luce model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157, 102541. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102541>
- [5] Ensafian, H., Zare Andaryan, A., Bell, M. G. H., Glenn Geers, D., Kilby, P. y Li, J. (2023). Cost-optimal deployment of autonomous mobile lockers co-operating with couriers for simultaneous pickup and delivery operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 146, 103958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103958>
- [6] Woody, M., Craig, M. T., Vaishnav, P. T., Lewis, G. M. y Keoleian, G. A. (2022). Optimizing future cost and emissions of electric delivery vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 26(3), 1108–1122. doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.13263>
- [7] González-Varona, J. M., Villafañez, F., Acebes, F., Redondo, A. y Poza, D. (2020). Reusing newspaper kiosks for last-mile delivery in urban areas. *Sustainability*, 12(22), 9770. doi: <https://doi.org/10.3390/su12229770>
- [8] Kaszubowski, D. (2019). A method for the evaluation of urban freight transport models as a tool for improving the delivery of sustainable urban transport policy. *Sustainability*, 11(6), 1535. doi: <https://doi.org/10.3390/su11061535>
- [9] Reyes-Rubiano, L., Serrano-Hernandez, A., Montoya-Torres, J. R. y Faulin, J. (2021). The sustainability dimensions in intelligent urban transportation: a paradigm for smart cities. *Sustainability*, 13(19), 10653. doi: <https://doi.org/10.3390/su131910653>
- [10] Otte, T. y Meisen, T. (2021). A reference framework for the performance-based decision support of city authorities in urban freight transport. *International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1109/ICISS53185.2021.9533210>
- [11] Galati, A., Giacommarra, M., Concialdi, P. y Crescimanno, M. (2021). Exploring the feasibility of introducing electric freight vehicles in the short food supply chain: A multi-stakeholder approach. *Case Studies on Transport Policy*, 9(2), 950–957. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.04.015>
- [12] Zhang, R., Dou, L., Xin, B., Chen, C., Deng, F. y Chen, J. (2023). A review on the truck and drone cooperative delivery problem. *Unmanned Systems*, 1–25. doi: <https://doi.org/10.1142/S2301385024300014>
- [13] Nenni, M. E., Sforza, A. y Sterle, C. (2019). Sustainability-based review of urban freight models. *Soft Computing*, 23(9), 2899–2909. doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03786-x>
- [14] Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B. y Roccotelli, M. (2018). A review of last mile logistics innovations in and externalities cost reduction vision. *Sustainability*, 10(3), 782. doi: <https://doi.org/10.3390/su10030782>
- [15] Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- [16] Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. y Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- [17] Russo, F. y Comi, A. (2016). Urban freight transport planning towards green goals: Synthetic environmental evidence from tested results. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4). doi: <https://doi.org/10.3390/su8040381>
- [18] Trott, M., Baur, N.-F., Auf der Landwehr, M., Rieck, J. y von Viebahn, C. (2021). Evaluating the role of commercial parking bays for urban stakeholders on last-mile deliveries – A consideration of various sustainability aspects. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127462. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127462>



- [19] Le Colleter, T., Dumez, D., Lehuédé, F. y Péton, O. (2023). Small and large neighborhood search for the park-and-loop routing problem with parking selection. *European Journal of Operational Research*, 308(3), 1233–1248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.007>
- [20] Salama, M. R. y Srinivas, S. (2022). Collaborative truck multi-drone routing and scheduling problem: Package delivery with flexible launch and recovery sites. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164, 102788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102788>
- [21] Wang, Y., Tian, X. y Liu, D. (2017). Optimization of urban multi-level logistics distribution network based on the perspective of low carbon. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, 4896–4900. doi: <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243646>
- [22] Schermer, D., Moeini, M. y Wendt, O. (2019). A hybrid VNS/Tabu search algorithm for solving the vehicle routing problem with drones and en route operations. *Computers & Operations Research*, 109, 134–158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.04.021>
- [23] De Oliveira Mota, D. (2021). Dynamic dispatch algorithm proposal for last-mile delivery vehicle. *IEEE Latin America Transactions*, 19(10), 1618–1623. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9477223>
- [24] Ko, S., Cho, S. y Lee, C. (2018). Pricing and collaboration in last mile delivery services. *Sustainability*, 10(12), 4560. doi: <https://doi.org/10.3390/su10124560>
- [25] Sacramento, D., Pisinger, D. y Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, 289–315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.018>
- [26] Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J. R. y Jaca, C. (2018). Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: A case study. *International Journal of Production Economics*, 197, 232–242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.011>
- [27] Resat, H. G. (2020). Design and analysis of novel hybrid multi-objective optimization approach for data-driven sustainable delivery systems. *IEEE Access*, 8, 90280–90293. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994186>
- [28] Fatnassi, E., Chaouachi, J. y Klihi, W. (2015). Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 440–460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.016>
- [29] Paul, S. y Doreswamy, G. (2021). Simulation and optimization framework for on-demand grocery delivery. *Winter Simulation Conference (WSC)*, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715480>
- [30] Wang, Y., Ropke, S., Wen, M. y Bergh, S. (2023). The mobile production vehicle routing problem: Using 3D printing in last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 305(3), 1407–1423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.038>
- [31] Gruzauskas, V., Burinskiene, A. y Krisciunas, A. (2023). Application of information-sharing for resilient and sustainable food delivery in last-mile logistics. *Mathematics*, 11(2), 303. doi: <https://doi.org/10.3390/math11020303>
- [32] Regué, R. y Bristow, A. L. (2013). Appraising freight tram schemes: a case study of Barcelona. *EJTIR Issue*, 13(1), 56–78. [www.ejtir.tbm.tudelft.nl](http://www.ejtir.tbm.tudelft.nl)
- [33] Tan, Y., Deng, L., Li, L. y Yuan, F. (2019). The capacitated pollution routing problem with pickup and delivery in the last mile. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 31(4), 1193–1215. doi: <https://doi.org/10.1108/APJML-06-2018-0217>
- [34] Jiang, L., Chang, H., Zhao, S., Dong, J. y Lu, W. (2019). A travelling salesman problem with carbon emission reduction in the last mile delivery. *IEEE Access*, 7, 61620–61627. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915634>
- [35] Aloui, A., Hamani, N. y Delahoche, L. (2021). An integrated optimization approach using a collaborative strategy for sustainable cities freight transportation: A Case study. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103331>
- [36] Akkad, M. Z. y Bányai, T. (2020). Multi-objective approach for optimization of city logistics considering energy efficiency. *Sustainability*, 12(18), 7366. doi: <https://doi.org/10.3390/su12187366>



- [37] Betti Sorbelli, F., Corò, F., Das, S. K., Palazzetti, L. y Pinotti, C. M. (2022). On the scheduling of conflictual deliveries in a last-mile delivery scenario with truck-carried drones. *Pervasive and Mobile Computing*, 87, 101700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmj.2022.101700>
- [38] Olapiriyakul, S. y Nguyen, T.T. (2019). Land use and public health impact assessment in a supply chain network design problem: A case study. *Journal of Transport Geography*, 75, 70–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.01.011>
- [39] Muñoz-Villamizar, A., Quintero-Araújo, C. L., Montoya-Torres, J. R. y Faulin, J. (2019). Short- and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks: a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22(3), 229–252. doi: <https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1513467>
- [40] Lu, M., Huang, C. y Teng, J. (2022). Multi-agent simulation for online fresh food autonomous delivery. *Xitong Fangzhen Xuebao / Journal of System Simulation*, 34(6), 1185–1195. doi: <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-1050>
- [41] Ratnagiri, M., O'Dwyer, C., Beaver, L. E., Bang, H., Chalaki, B. y Malikipoulos, A. A. (2022). A scalable last-mile delivery service: from simulation to scaled experiment. *IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 4163–4168. doi: <https://doi.org/10.1109/ITSC51140.2022.9921797>
- [42] Gaudron, A., Tamayo, S. y Fortelle, A. de La. (2020). Interactive simulation for collective decision making in city logistics. *Transportation Research Procedia*, 46, 157–164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.176>
- [43] Fehn, F., Engelhardt, R., Dandl, F., Bogenberger, K. y Busch, F. (2023). Integrating parcel deliveries into a ride-pooling service—An agent-based simulation study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.103580>
- [44] Horner, H., Pazour, J. y Mitchell, J. E. (2021). Optimizing driver menus under stochastic selection behavior for ridesharing and crowdsourced delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 153, 102419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102419>
- [45] Manchella, K., Haliem, M., Aggarwal, V. y Bhargava, B. (2022). PassGoodPool: joint passengers and goods fleet management with reinforcement learning aided pricing, matching, and route planning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 3866–3877. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3128877>
- [46] Ehmke, J. F. y Campbell, A. M. (2014). Customer acceptance mechanisms for home deliveries in metropolitan areas. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 193–207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.028>
- [47] Guzenko, A. y Guzenko, N. (2022). Process optimization for last mile logistics. *Transportation Research Procedia*, 63, 1700–1707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.184>
- [48] Wang, C., Lan, H., Saldanha-da-Gama, F. y Chen, Y. (2021). on optimizing a multi-mode last-mile parcel delivery system with vans, truck and Drone. *Electronics*, 10(20), 2510. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10202510>
- [49] Bozkaya, B., Salman, F. S. y Telciler, K. (2017). An adaptive and diversified vehicle routing approach to reducing the security risk of cash-in-transit operations. *Networks*, 69(3), 256–269. doi: <https://doi.org/10.1002/net.21735>
- [50] Huang, D. y Han, M. (2021). An optimization route selection method of urban oversize cargo transportation. *Applied Sciences*, 11(5), 2213. doi: <https://doi.org/10.3390/app11052213>
- [51] Sawik, B., Serrano-Hernandez, A., Muro, A. y Faulin, J. (2022). Multi-Criteria simulation-optimization analysis of usage of automated parcel lockers: a practical approach. *Mathematics*, 10(23), 4423. doi: <https://doi.org/10.3390/math10234423>
- [52] Baudel, T., Dablanc, L., Alguiar-Melgarejo, P. y Ashton, J. (2016). Optimizing urban freight deliveries: from designing and testing a prototype system to addressing real life challenges. *Transportation Research Procedia*, 12, 170–180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.056>
- [53] Šego, D., Hinić, M. L. y Poljičak, A.-M. (2020). Methods of goods delivery to the historic core of the city of šibenik during the tourist season. *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*, 11(1), 88–98. doi: <https://doi.org/10.2478/logi-2020-0009>
- [54] Ezquerro, S., Moura, J. L. y Alonso, B. (2020). Illegal use of loading bays and its impact on the use of public space. *Sustainability*, 12(15), 5915. doi: <https://doi.org/10.3390/su12155915>
- [55] Hu, W., Dong, J., Hwang, B., Ren, R. y Chen, Z. (2020). Hybrid optimization procedures applying for two-echelon urban underground logistics network planning: A case study of Beijing. *Computers & Industrial Engineering*, 144, 106452. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106452>



- [56] Muriel, J. E., Zhang, L., Franso, J. C. y Perez-Franco, R. (2022). Assessing the impacts of last mile delivery strategies on delivery vehicles and traffic network performance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 144, 103915. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103915>
- [57] Moufad, I., Jawab, F. y Bouklata, A. (2019). A simulation framework to study the impacts of loading/unloading areas on the urban traffic. *2019 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA.2019.8907304>
- [58] Hiremath, N. C., Sahu, S. y Tiwari, M. K. (2013). Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(6), 1071–1084. doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0635-8>
- [59] Rezgui, D., Chaouachi Siala, J., Aggoune-Mtala, W. y Bouziri, H. (2019). Application of a variable neighborhood search algorithm to a fleet size and mix vehicle routing problem with electric modular vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 537–550. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.001>
- [60] Perboli, G. y Rosano, M. (2019). Parcel delivery in urban areas: Opportunities and threats for the mix of traditional and green business models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99, 19–36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.006>
- [61] Xia, Y., Zeng, W., Xing, X., Zhan, Y., Tan, K. H. y Kumar, A. (2023). Joint optimisation of drone routing and battery wear for sustainable supply chain development: a mixed-integer programming model based on blockchain-enabled fleet sharing. *Annals of Operations Research*, 327(1), 89–127. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04459-5>
- [62] Tamke, F. y Buscher, U. (2021). A branch-and-cut algorithm for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 144, 174–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.11.011>
- [63] Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R. G. y Öberg, C. (2022). Last-mile logistics of perishable products: a review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 50(13), 116–139. doi: <https://doi.org/10.1108/IJRD-02-2021-0080>
- [64] Jiang, L., Zang, X., Alghoul, I. I. Y., Fang, X., Dong, J. y Liang, C. (2022). Scheduling the covering delivery problem in last mile delivery. *Expert Systems with Applications*, 187, 115894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115894>
- [65] Li, S., Liang, Y., Wang, Z. y Zhang, D. (2021). An optimization model of a sustainable city logistics network design based on goal programming. *Sustainability*, 13(13), 7418. doi: <https://doi.org/10.3390/su13137418>
- [66] HariPriya, K. y Ganesan, V. K. (2022). Solving Large Scale Vehicle Routing Problems with Hard Time Windows under Travel Time Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 233–238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.394>
- [67] Li, J., Fang, Y. y Tang, N. (2022). A cluster-based optimization framework for vehicle routing problem with workload balance. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108221>
- [68] Gómez-Marín, C. G., Mosquera-Tobón, J. D. y Serna-Urán, C. A. (2023). Integrating multi-agent system and microsimulation for dynamic modeling of urban freight transport. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 57(4), 409–416. doi: <https://doi.org/10.3311/PPtr.21024>
- [69] Guimarães, L. R., de Sousa, J. P. y Prata, B. de A. (2022). Variable fixing heuristics for the capacitated multicommodity network flow problem with multiple transport lines, a heterogeneous fleet and time windows. *Transportation Letters*, 14(2), 84–93. doi: <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1815143>
- [70] Chen, F. y Wang, Y. (2020). Downward compatible loading optimization with inter-set cost in automobile outbound logistics. *European Journal of Operational Research*, 287(1), 106–118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.029>
- [71] Raj, R. y Murray, C. (2020). The multiple flying sidekicks traveling salesman problem with variable drone speeds. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102813. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102813>
- [72] Nguyen, M. A., Dang, G. T.-H., Hà, M. H. y Pham, M.-T. (2022). The min-cost parallel drone scheduling vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 299(3), 910–930. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.008>
- [73] Luo, Z., Poon, M., Zhang, Z., Liu, Z. y Lim, A. (2021). The Multi-visit traveling salesman problem with multi-drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128, 103172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103172>
- [74] Xu, Y., Tong, Y., Shi, Y., Tao, Q., Xu, K. y Li, W. (2019). An efficient insertion operator in dynamic ridesharing services. *IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE)*, 1022–1033. doi: <https://doi.org/10.1109/ICDE.2019.00095>



- [75] Yu, H., Luo, X. y Wu, T. (2022). Online pickup and delivery problem with constrained capacity to minimize latency. *Journal of Combinatorial Optimization*, 43(5), 974–993. doi: <https://doi.org/10.1007/s10878-020-00615-y>
- [76] Wang, K., Yuan, B., Zhao, M. y Lu, Y. (2020). Cooperative route planning for the drone and truck in delivery services: A bi-objective optimisation approach. *Journal of the Operational Research Society*, 71(10), 1657–1674. doi: <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1621671>
- [77] Miguel, F., Frutos, M., Tohme, F. y Babey, M. M. (2019). a decision support tool for urban freight transport planning based on a multi-objective evolutionary algorithm. *IEEE Access*, 7, 156707–156721. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949948>
- [78] Ji, Y., Qu, S. y Yu, Z. (2017). Bi-level multi-objective optimization model for last mile delivery using a discrete approach. *Journal of Difference Equations and Applications*, 23(1–2), 179–190. doi: <https://doi.org/10.1080/10236198.2016.1210607>
- [79] Borghetti, F., Caballini, C., Carboni, A., Grossato, G., Maja, R. y Barabino, B. (2022). The use of drones for last-mile delivery: a numerical case study in Milan, Italy. *Sustainability*, 14(3), 1766. doi: <https://doi.org/10.3390/su14031766>
- [80] Keimer, A., Laurent-Brouty, N., Farokhi, F., Signargout, H., Cvetkovic, V., Bayen, A. M. y Johansson, K. H. (2018). Information Patterns in the Modeling and Design of Mobility Management Services. *Proceedings of the IEEE*, 106(4), 554–576. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2800001>
- [81] Crainic, T. G., Errico, F., Rei, W. y Ricciardi, N. (2016). Modeling demand uncertainty in two-tier city logistics tactical planning. *Transportation Science*, 50(2), 559–578. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0606>
- [82] Chu, H., Zhang, W., Bai, P. y Chen, Y. (2023). Data-driven optimization for last-mile delivery. *Complex & Intelligent Systems*, 9(3), 2271–2284. doi: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00293-1>
- [83] Le Pira, M., Marcucci, E., Gatta, V., Inturri, G., Ignaccolo, M. y Pluchino, A. (2017). Integrating discrete choice models and agent-based models for ex-ante evaluation of stakeholder policy acceptability in urban freight transport. *Research in Transportation Economics*, 64, 13–25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.08.002>
- [84] Thaller, C., Niemann, F., Dahmen, B., Clausen, U. y Leerkamp, B. (2017). Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics. *Transportation Research Procedia*, 25, 1075–1094. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.480>
- [85] Emberger, G. y Pfaffenbichler, P. (2020). A quantitative analysis of potential impacts of automated vehicles in Austria using a dynamic integrated land use and transport interaction model. *Transport Policy*, 98, 57–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.014>
- [86] Zeng, Y., Tong, Y. y Chen, L. (2020). Last-mile delivery made practical: An efficient route planning framework with theoretical guarantees. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 13(3), 320–333. doi: <https://doi.org/10.14778/3368289.3368297>
- [87] Salama, M. y Srinivas, S. (2020). Joint optimization of customer location clustering and drone-based routing for last-mile deliveries. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 620–642. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.019>
- [88] Yeomans, J. S. (2021). A multicriteria, bat algorithm approach for computing the range limited routing problem for electric trucks. *Wseas Transactions On Circuits And Systems*, 20, 96–106. doi: <https://doi.org/10.37394/23201.2021.20.13>
- [89] Pelletier, S., Jabali, O. y Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225–255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.06.006>
- [90] Iwan, S. y Malecki, K. (2017). Utilization of cellular automata for analysis of the efficiency of urban freight transport measures based on loading/unloading bays example. *Transportation Research Procedia*, 25, 1021–1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.476>
- [91] Vishwanath, A., Gan, H. S., Kalyanaraman, S., Winter, S. y Mareels, I. (2014). Personalised public transportation: A new mobility model for urban and suburban transportation. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1831–1836. doi: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957959>
- [92] Bányai, T. (2018). Real-Time decision making in first mile and last mile logistics: how smart scheduling affects energy efficiency of hyperconnected supply chain solutions. *Energies*, 11(7), 1833. doi: <https://doi.org/10.3390/en11071833>



- [93] Validi, S., Bhattacharya, A. y Byrne, P. J. (2020). Sustainable distribution system design: a two-phase DoE-guided meta-heuristic solution approach for a three-echelon bi-objective AHP-integrated location-routing model. *Annals of Operations Research*, 290(1–2), 191–222. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2887-y>
- [94] Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C. y Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and 'grey zone' customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 940–958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
- [95] Stinson, M., Enam, A., Moore, A. y Auld, J. (2019). Citywide impacts of e-commerce. *Proceedings of the 2nd ACM/EIGSCC Symposium on Smart Cities and Communities*, 10, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1145/3357492.3358633>
- [96] de Grancy, G. S. (2015). An Adaptive Metaheuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows and Multiple Service Workers. *J. Univers. Comput. Sci.*, 21, 1143–1167. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14308183>
- [97] Ren, T., Jiang, Z., Cai, X., Yu, Y., Xing, L., Zhuang, Y. y Li, Z. (2021). A dynamic routing optimization problem considering joint delivery of passengers and parcels. *Neural Computing and Applications*, 33(16), 10323–10334. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05794-1>
- [98] Arbabi, H., Nasiri, M. M. y Bozorgi-Amiri, A. (2021). A hub-and-spoke architecture for a parcel delivery system using the cross-docking distribution strategy. *Engineering Optimization*, 53(9), 1593–1612. doi: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1808973>
- [99] Liu, D., Yan, P., Pu, Z., Wang, Y. y Kaisar, E. I. (2021b). Hybrid artificial immune algorithm for optimizing a Van-Robot E-grocery delivery system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 154, 102466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102466>
- [100] Dang, Y., Allen, T. T. y Singh, M. (2022). A heterogeneous vehicle routing problem with common carriers and time regulations: Mathematical formulation and a two-color ant colony search. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108036>
- [101] Mohamed Ben, S., Jawab Sidi Mohamed Ben, F., Imane, M. y Fouad, J. (2020). Dassaia: A Micro-Simulation approach to diagnose urban freight delivery areas impacts on traffic flow. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(2), 3737–3742.
- [102] Xu, Y., Tong, Y., Shi, Y., Tao, Q., Xu, K. y Li, W. (2019). An Efficient Insertion Operator in Dynamic Ridesharing Services. *IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE)*, 1022–1033. doi: <https://doi.org/10.1109/ICDE.2019.0009>
- [103] Yuan, Y., Cattaruzza, D., Ogier, M., Semet, F. y Vigo, D. (2021). A column generation based heuristic for the generalized vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102391. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102391>
- [104] Amiri, M. y Farvaresh, H. (2023). Carrier collaboration with the simultaneous presence of transferable and non-transferable utilities. *European Journal of Operational Research*, 304(2), 596–617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.04.033>