



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

VOLUMEN XIX (2025): ENERO-DICIEMBRE | PUBLICACIÓN CONTINUA



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

Revista adherida a la
Declaración de San Francisco



DORA



Crossref



LatinREV



Revista de
Ciencia y Tecnología
de la Universidad
Autónoma de Chihuahua



DOAJ



LOCKSS

MIAR

Matriz de Información para el
Análisis de Revistas



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

PERIÓDICA
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología



2683-3360

TECNOCIENCIA CHIHUAHUA (Vol. 19, enero-diciembre de 2025). Es una publicación anual continua, editada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua. (C. Escorza núm. 900, Col. Centro, Chihuahua, Chihuahua, México. C.P. 31000) <https://revistascientificas.uach.mx/index.php/tecnociencia>; tecnociencia.chihuahua@uach.mx Teléfono: (614) 4 39 18 22, ext. 2222. Editor responsable: Armando Quintero Ramos. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2018-070312595700-203. ISSN 1870-6606, ISSN-e: 2683-3360 otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dirección de Investigación y Posgrado.



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado



Vol. XIX Enero-Diciembre, 2025



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado



<https://doi.org/10.54167/tch.v19i1>

Todos los contenidos de TECNOCENCIA CHIHUAHUA se publican bajo la licencia de [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), y pueden ser usados gratuitamente para fines no comerciales, dando los créditos a los autores y a la revista, como lo establece esta licencia.



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX Enero-Diciembre, 2025



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Autoridades Institucionales

Mtro. Luis Alfonso Rivera Campos

Rector

**C.P. Jesús Ignacio
Rodríguez Bejarano**

Secretario General

**Lic. Martha Lorena Mier
Calderón**

Directora Académica

**Dr. Luis Carlos Hinojos
Gallardo**

*Director de Investigación y
Posgrado*

**L.A.E. Alberto Eloy
Espino Dickens**

Director Administrativo

**Dra. Ruth del Carmen
Grajeda González**

*Directora de Extensión y
Difusión Cultural*

**M.A.P. Marcela Herrera
Sandoval**

*Directora de Planeación y
Desarrollo Institucional*



Equipo Editorial

Editor responsable

Dr. Armando Quintero Ramos, Universidad Autónoma de Chihuahua, México. (SNII III)

Asistente editorial

M.E.S. Nancy Karina Venegas Hernández, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Editores Asociados

Dr. Rubén Francisco González Laredo, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNII, Nivel III)

Dra. Luz Araceli Ochoa Martínez, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNII, Nivel II)

Dr. Gerardo Méndez Zamora, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. (SNII, Nivel I)



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX Enero-Diciembre, 2025

Comité Científico

Alimentos y biotecnología

Dr. Benjamín Ramírez Wong, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. (SNII, Nivel III).

Dr. José Alberto Gallegos Infante, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNII, Nivel III)

Dr. José Rafael Minjares-Fuentes, Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México. (SNII, Nivel I)

Dra. María Marcela Rodríguez, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Olavarría, Argentina.

Dra. Valeria Soledad Eim Iznardo, Universidad de las Islas Baleares, Islas Baleares, España.

Efrén Delgado, Ph.D., New Mexico State University, Las Cruces, NM. Estados Unidos de Norteamérica.

Dra. Elizabeth Carvajal Millán, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Hermosillo, Sonora, México. (SNII, Nivel III).

Dr. Fernando Martínez Bustos, CINVESTAV, Unidad Querétaro, Querétaro, México. (SNII, Nivel III)

Dr. José de Jesús Zazueta Morales, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán México. (SNII, Nivel I)

Dra. Deborah Murowaniecki Otero, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahía, Brasil.

Dr. René Renato Balandrán Quintana, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (SNII, Nivel I)

Agricultura y Agropecuaria

Dr. Guillermo Fuentes Dávila, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.

Dr. Víctor Arturo González Hernández, Colegio de Posgraduados. Estado de México, México (SNII, Nivel III)

Dra. Yolanda Salinas Moreno, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Departamento de Genética, México. (SNII, Nivel III)

Química y Recursos Naturales

Nadezhda Traycheva Petkova, PhD., University of Food Technologies, Technological Faculty, Department of Organic Chemistry and Inorganic Chemistry, Bulgaria.

Dra. Carmen Oralia Melendez Pizarro, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Nivel II)

Dr. David Morales Morales, Universidad Nacional Autónoma de México (SNII, Nivel III).

Prasenjit Ghosh, Ph.D., Indian Institute of Technology Bombay: Mumbai, Maharashtra, IN

Dr. Johan Mendoza Chacón, Universidad Autónoma de Chihuahua (SNII, Nivel I)

Salud y Cultura Física

Dr. Julián Esparza Romero, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C (CIAD). Unidad Hermosillo, Sonora. México (SNII, Nivel II)

Dra. Jazmín Leticia Tobías Espinoza, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Candidato a Investigador)

Dra. Silvia Giono Cerezo, Instituto Politécnico Nacional. (SNII, Nivel II)

Dra. Susana Aideé González Chávez, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Nivel II)

Dra. Mercedes Bermúdez Cortés, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Nivel I)

Ingeniería

Dr. Francisco Paraguay Delgado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Chihuahua, México. (SNII, Nivel III)

Dr. Vladimir Villarreal Contreras, Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá

Dr. Humberto González Rodríguez, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. (SNII, Nivel II)

Dra. Melida Gutierrez, Missouri State University, Springfield, MO, USA.

Dr. Sergio Valle Cervantes, Instituto Tecnológico de Durango (SNII, Nivel I)

Tecnología

M.C. Ricardo Talamás Abbud, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México



Definición de la revista

TECNOCENCIA CHIHUAHUA, es una revista multidisciplinaria, de publicación anual continua, que publica artículos y notas científicas, así como artículos de revisión originales e inéditos, en español e inglés, en formato electrónico de acceso abierto diamante.

El objetivo de *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* es divulgar los resultados y avances de investigación originales e inéditos en las áreas temáticas de Alimentos, Biológica, Salud, Agropecuaria, Cultura Física, Ingeniería y Tecnología, Química y Recursos Naturales, dirigidos a investigadores, académicos, estudiantes y público con interés científico.

El contenido científico y calidad de los artículos son evaluados a través de un proceso de arbitraje de forma anónima en la modalidad de doble ciego por al menos tres árbitros especializados en la materia.

La revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* es editada y financiada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México. La revista está adherida a la Declaración de San Francisco a través de DORA (Declaration on Research Assessment) se encuentra indexada en portales especializados como DOAJ (Directory of Open Access Journals), ROAD (Directory of Open Access Scholarly Resources), MIAR (Matriz de Información para el Análisis de Revistas), Latindex 2.0 (38 puntos de 38), Periódica, LatinREV y en Redes Académicas como Biblat, Google Académico y Academia. La revista cuenta con el DOI (Digital Object Identifier) a través de la organización internacional Crossref.



Contenido

Alimentos

Aplicación de aceite esencial de orégano (*Lippia berlandieri* Schauer) en la conservación de chorizo mexicano

e1859

Application of Essential Oil of Oregano (*Lippia berlandieri* Schauer) in the Preservation of Mexican Chorizo

Olademis Rubi Castellanos-Santos, Gerardo Méndez-Zamora, Jocelyn Abigail Rivera De Alba, Emmanuel Flores Girón*

Solubility of Part-Baked Bread Gluten Protein During Frozen Storage

e2030

Solubilidad de las proteínas del gluten en pan pre-horneado durante el almacenamiento en congelación

Ana Irene Ledesma-Osuna, Beatriz Montañón-Leyva, José Luis Espinoza-Acosta, Mariela

Menchaca-Armenta, María Fernanda Amaya-Villalva, Guadalupe Amanda López-Ahumada, Jesús Enrique Gerardo-Rodríguez*

Salud

Disruptores endocrinos: impacto en ejes hormonales y estrategias nutricionales. Revisión narrativa

e1796

Endocrine Disruptors: Impact on Hormonal Axes and Nutritional Strategies. A Narrative Review

Diana Cecilia Grajeda-Portillo, Ana Karen García-Quezada, Rocío Ruiz-Leyva, Adriana Castillo-Estrada, Blanca Elena Hernández-Tarín, Gloria Alejandra Fernández-Rodríguez, Mariana García-Aguilar, Blanca G. Beltrán-Piña*

Consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores familiares: una revisión de alcance

e1800

Alcohol, Tobacco, and Nonprescription Drug Use in Family Caregivers: A Scoping Review

Mariana Vargas-Beltrán, Lorena Chaparro-Díaz*, Francisco Rafael Guzmán-Facundo

Agropecuaria

Crecimiento, rendimiento y calidad de chile habanero bajo condiciones de malla sombra de colores

e1662

Growth, yield and quality of habanero chili grown under shade nets of different colors

Ana María Castillo-González*, Eduardo Ortiz-Mendoza, Luis Alonso Valdez-Aguilar, Edilberto Avitia-García, María del Rosario García-Mateos, Ma. Carmen Ybarra-Moncada

Variation of the seed and foliar phenolic contents of five wild forms of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)

e1691

Variación del contenido fenólico foliar y de semillas de cinco formas silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)

Shaila Nayeli Pérez-Salinas, Rene Torres Ricario, Nancy Nohemí Rodarte Rodríguez, Heberto Iván Salas Ayala, Liliana Wallander Compeán*

Efecto antifúngico de compuestos fenólicos del grano de maíz sobre el desarrollo in vitro de *Fusarium verticillioides*

e1754

Antifungal effect of phenolic compounds from maize grain on the in vitro development of *Fusarium verticillioides*

Norma Yadira Zacamo-Velázquez*, Javier Ireta-Moreno, Yolanda Salinas-Moreno, Ricardo Zacamo-Velázquez

Ingeniería y Tecnología

Valorización de pellets combustibles usando aserrín de 23 especies de maderas mexicanas

e1829

Valorization of fuel pellets using sawdust from 23 Mexican species

María Alejandra Ramírez-Ramírez, Artemio Carrillo-Parra, Faustino Ruiz-Aquino, Concepción Luján-Álvarez, Juan José Hernández-Solís, Noel Carrillo-Ávila, Luis Fernando Pintor-Ibarra, José Guadalupe Rutiaga-Quñones*

Dynamic Simulation of a Non-linear CSTR Using Scilab/Xcos®: a Practical Approach for Chemical Engineering Education

e1874

Simulación dinámica de un CSTR no lineal usando Scilab/Xcos®: un enfoque práctico para la enseñanza de la Ingeniería Química

Luis Carlos Juárez-Martínez*; Javier Tovar-Facio, Rocío Anchondo-Granados, Rosalía Ruiz-Santos, Anel Rocío Carrasco-Hernández





Sintonización y evaluación de observadores lineales proporcionales Luenberger mediante asignación de polos para la cristalización por lotes

e1918

Tuning and evaluation of proportional linear Luenberger observers by pole placement for batch crystallization

Maximiliano López Morales, María de Jesús García-Gómez, Cirilo Nolasco Hipólito, Raúl Colorado Peralta, Oscar Núñez Gaona, Alfonso Flores Meza, Jesús Carrillo Ahumada*

Prácticas Lean en México: Un análisis de adopción en plantas multinacionales

e1975

Lean Practices in Mexico: An Analysis of Adoption in Multinational Plants

Jesús Arturo Chávez Pineda*

Patrones de consumo y predicción con redes neuronales en comercio electrónico para un producto insignia: caso del Reino Unido

e1988

Consumption patterns and prediction with neural networks in e-commerce from a star product: case of United Kingdom

Arely Abigail Domínguez Barreto, Oscar Domínguez Barreto*, Héctor Daniel Molina Ruiz

Química y Recursos Naturales

Margaritasita: Un mineral exclusivamente Chihuahuense

e1675

Margaritasite: an exclusive Chihuahuan mineral

Fabián Guadalupe Faudoa-Gómez*, María Elena Montero-Cabrera, Hilda Esperanza Esparza-Ponce, Luis Edmundo Fuentes-Cobas, Jesús Gonzalo Canche-Tello

Composición química y actividad antioxidante en estambres de cuatro especies de *Cylindropuntia*: influencia del solvente de extracción

e1802

Chemical Composition and Antioxidant Activity of Stamens from Four *Cylindropuntia* Species: Influence of the Extraction Solvent

Kevin Alexis Madrigal-Hernández, Raquel González-Fernández, José Valero-Galván*





Composición química de mezclas de aserrín; y, de madera y corteza de cuatro especies de Pinus spp. de Durango, México

e1912

Chemical composition of sawdust mixtures, and wood and bark from four Pinus spp. species from Durango, Mexico

José Guadalupe Rutiaga Quiñones, Rubén Francisco González Laredo, Melissa Bocanegra Salazar, Jorge Armando Chávez Simental, Jesús Noel Fregoso Madueño, José Rodolfo Goche Télles*

Métodos de clasificación de datos en SIG para estimar recarga de agua subterránea en México

e2020

Data classification methods in GIS for groundwater recharge estimation in Mexico

Miguel Ángel González-Núñez*, Alejandro Villalobos-Aragón, Álvaro Enrique Fernández-Escalante, Nuria Naranjo-Fernández

Water Governance Under Pressure: Institutional Performance and Resource Management in Mexico

e2021

Gobernanza del agua bajo presión: desempeño institucional y gestión de recursos en México

David Sanchez*, Carmen Julia Navarro-Gómez

Evaluación de la actividad antitopoisomerasa de extractos acuosos de semilla de Pithecellobium dulce obtenidos mediante extracción asistida por ultrasonido

e2087

Evaluation of the antitopoisomerase activity of aqueous seed extracts of sweet Pithecellobium obtained by ultrasound-assisted extraction

Gladys América Prado-Guzmán, Herenia Adilene Miramontes-Escobar, Víctor Manuel Zamora-Gasga, Alejandro Pérez-Larios, Jorge Alberto Sánchez-Burgos*

Guía para autores

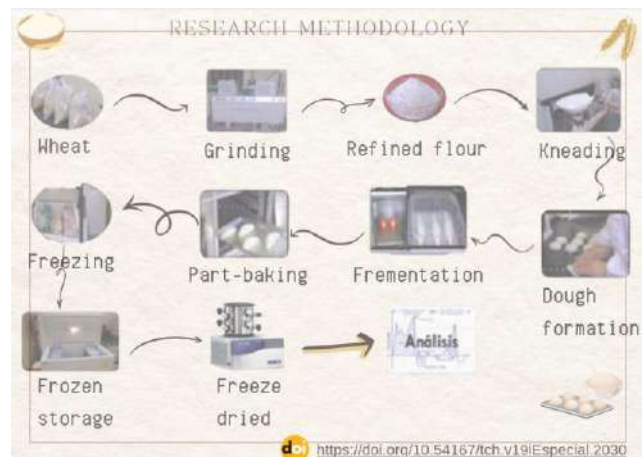
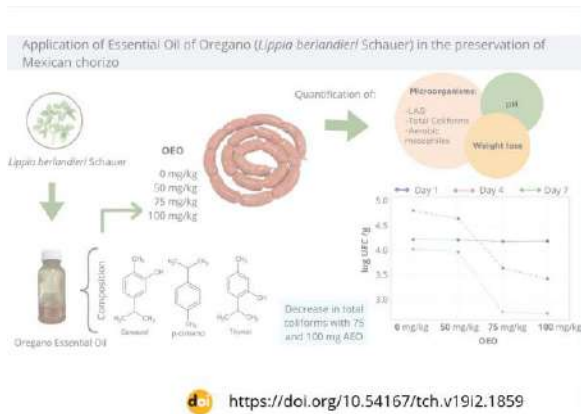


UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

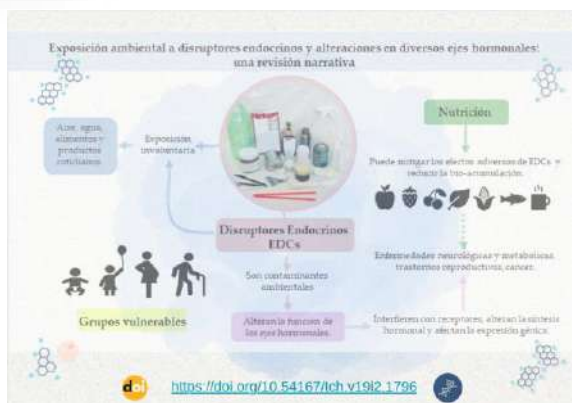
Vol. XIX Enero-Diciembre, 2025

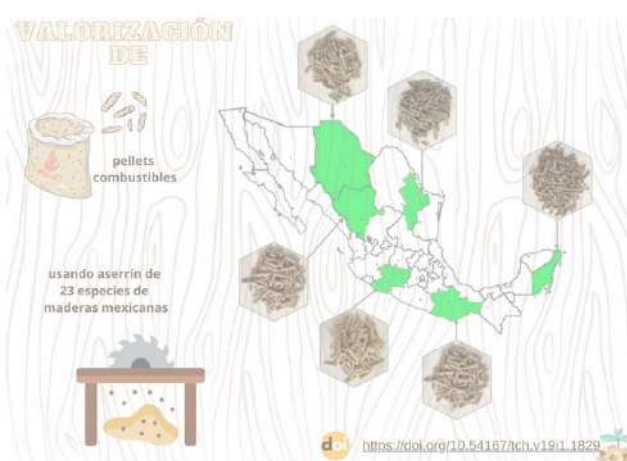


TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

2683-3360



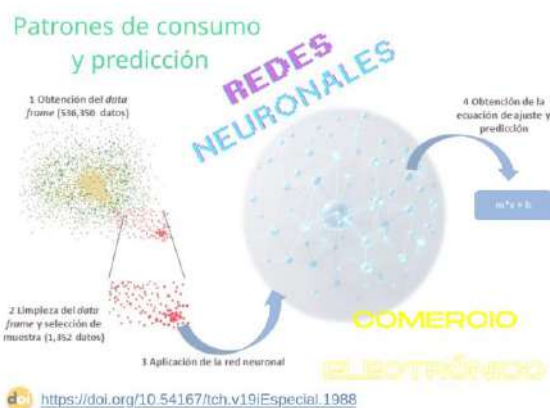
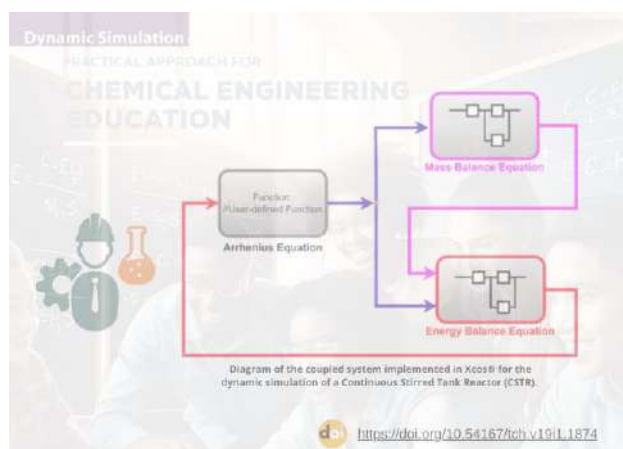


TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología



2683-3360

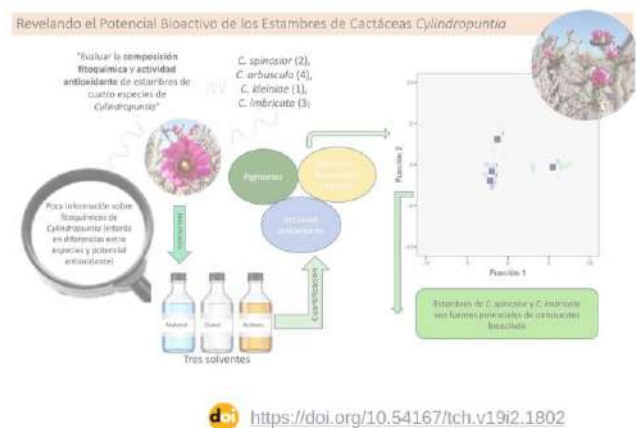
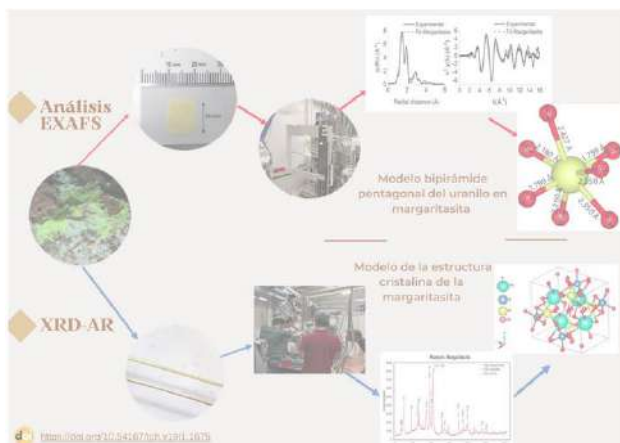


UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

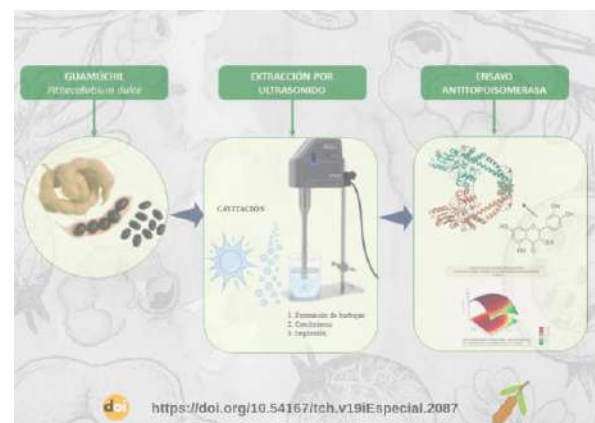
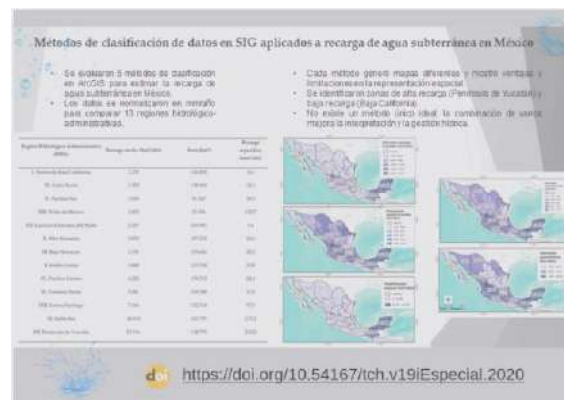
Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX Enero-Diciembre, 2025



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA
Revista de ciencia y tecnología 2683-3360



Aplicación de aceite esencial de orégano (*Lippia berlandieri* Schauer) en la conservación de chorizo mexicano

Application of Essential Oil of Oregano (*Lippia berlandieri* Schauer) in the preservation of Mexican chorizo

Olademis Rubi Castellanos-Santos¹, Gerardo Méndez-Zamora², Jocelyn Abigail Rivera-De Alba³, y Emmanuel Flores-Girón^{1*}

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Carr. Federal México- Texcoco km 38.5, CP. 56230, Texcoco, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Francisco Villa s/n, Ex Hacienda El Canadá, 66050, General Escobedo, Nuevo León, México.

³ Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n. Col. La Laguna Ticomán, 07340, G.A.M. Ciudad de México, México

*Correspondencia: Correo electrónico: efloresg@chapingo.mx (Emmanuel Flores Girón)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1859>

Recibido: 03 de marzo de 2025; Aceptado: 16 de junio de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. José Rafael Minjares-Fuentes

Resumen

El deterioro de productos cárnicos es principalmente causado por microorganismos patógenos que representan un riesgo para la salud del consumidor, para evitar este deterioro se suelen utilizar aditivos conservadores. Como alternativa a estos aditivos, se propone el uso de aceites esenciales naturales, los cuales contienen compuestos antimicrobianos. En esta investigación se evaluó el efecto del aceite esencial de orégano (AEO: *Lippia berlandieri* Schauer) utilizando cuatro concentraciones diferentes: 0, 50, 75 y 100 mg/kg sobre las propiedades fisicoquímicas y la calidad microbiológica del chorizo mexicano durante 1, 4 y 7 días de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C). Los resultados fisicoquímicos indicaron una disminución del pH y un aumento en la pérdida de peso a medida que avanza el tiempo de almacenamiento, sin que se observaran diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). En cuanto a los resultados microbiológicos las muestras que contenían 75 y 100 mg/kg AEO presentaron una menor población de coliformes totales ($p < 0.05$) al día 4 y 7 en comparación con el control. Mientras que las bacterias ácido lácticas y mesófilos aerobios aumentaron de forma exponencial al día 4 y 7 sin mostrar diferencias ($p > 0.05$) significativas entre los tratamientos.

Palabras clave: antimicrobiano, coliformes, bacterias ácido lácticas, mesófilos.

Abstract

The deterioration of meat products is mainly caused by pathogenic microorganisms that represent a risk to consumer health. To prevent this deterioration, preservative additives are often used. As an alternative to these additives, the use of natural essential oils, which contain antimicrobial compounds, is proposed. In this study, was to evaluate the effects of oregano essential oil (AEO: *Lippia berlandieri* Schauer) in four different concentrations: 0, 50, 75 y 100 mg/kg on the physicochemical characteristics and microbiological quality of Mexican chorizo stored at room temperature (25 °C) for 1, 4 and 7 days. The physicochemical results indicated a decrease in pH and an increase in weight loss as storage time increases, with no significant differences observed between treatments ($p > 0.05$). Regarding the microbiological results, the samples containing 75 and 100 mg/kg AEO showed a lower population of total coliforms ($p < 0.05$) on day 4 and 7 compared to the control. While lactic acid bacteria and aerobic mesophiles increased exponentially on day 4 and 7 without showing significant differences ($p > 0.05$) between treatments.

Keywords: antimicrobial, coliforms, lactic acid bacteria, mesophiles.

1. Introducción

En México, el sector de la industria cárnica ha incrementado su aporte al Producto Interno Bruto (PIB) en los últimos años, en 2021 representaba el 2 % del PIB anual, y para 2023 incrementó su participación a 2.3 %. Dentro de la industria alimentaria, las actividades de matanza, corte, empacado y elaboración de carnes son la segunda categoría más importante con un aporte de 28.8 % del PIB anual. En la elaboración de carnes frías, después de la salchicha y el jamón, destacan el chorizo y la longaniza, ocupando el tercer lugar por volumen de producción de productos cárnicos con un total anual de 42,031 toneladas (COMECARNE, 2023). El chorizo es un producto cárnico embutido elaborado a partir de carne y grasa de animales de abasto, que puede presentarse crudo, cocido, curado o madurado y es un producto muy importante dentro de la gastronomía mexicana que, comúnmente, se elabora con carne y grasa de cerdo, acompañada de chiles y especias (Cruz-Gil et al., 2022) e incluso se elaboran distintas variedades de chorizos tradicionales en los estados de Hidalgo, Veracruz, Oaxaca y el Estado de México (Becerril et al., 2019).

El chorizo mexicano suele comercializarse crudo, por lo que sus propiedades nutricionales y fisicoquímicas, como contenido proteico y alta actividad de agua, respectivamente, lo hacen susceptible a contaminación microbiana durante todo su proceso de producción y comercialización, dándole así una vida de anaquel corta que puede variar entre 7 y 10 días (Redondo-Solano et al., 2023).

En su mayoría, los microorganismos patógenos no deterioran las propiedades organolépticas de los alimentos, por lo que su presencia puede pasar desapercibida para el consumidor; sin embargo, su consumo puede dar lugar a enfermedades de origen alimentario, como infecciones gastrointestinales. Por el contrario, los microorganismos deterioradores, aunque alteran negativamente las características fisicoquímicas y sensoriales del alimento, no suelen ser de interés público (Ceja-Farias, 2022). Los microorganismos deterioradores que se han identificado en diversas investigaciones con más frecuencia en carnes rojas son *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae* spp., *Brochothrix thermofacta* y bacterias ácido lácticas. La mayoría de las señales de deterioro son

atribuibles al crecimiento no deseado de microorganismos hasta niveles inaceptables. Mientras que los microorganismos patógenos de mayor de importancia en la carne y productos cárnicos: *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Compylobacter* spp., *Clostridium perfringens* y *Yersinia* spp. (Gutierrez et al., 2020). Particularmente, en chorizos mexicanos se ha reportado la presencia de bacterias ácido lácticas, mesófilos aerobios, coliformes, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Staphylococcus aureus* (Becerril et al., 2019).

Ante esta problemática, se han utilizado, distintos métodos de conservación, tal como refrigeración, congelación, empaque al vacío, etc., de forma conjunta al uso de conservadores, para aumentar la vida útil de la carne y los productos cárnicos (Fernández et al., 2001). No obstante, las tendencias están enfocadas en el uso de sustancias de origen natural. Por esta razón, los aceites esenciales han emergido como conservadores naturales con un potencial antimicrobiano y antioxidante significativo (Enriquez et al., 2024), por lo que su aplicación se alinea con la creciente demanda de productos alimentarios inocuos, saludables y nutritivos por parte de los consumidores.

Los aceites esenciales son compuestos naturales obtenidos de metabolitos secundarios de plantas aromáticas, como el tomillo, orégano, eucalipto, etc. Su composición química depende de factores como su localización geográfica, composición del suelo, temporada de cosecha y método de extracción, entre otros, y se estima que cada aceite esencial contiene alrededor de 500 compuestos (como terpenos, terpenoides, compuestos alifáticos y aromáticos como aldehídos y fenoles) (Sakkas y Papadopoulou, 2017), de los cuales solo 2 o 3, denominados mayoritarios, determinan su actividad biológica.

El orégano es una de las especias de importancia culinaria más utilizadas a nivel mundial; el orégano mexicano (*Lippia berlandieri* Schauer) en particular es una especie ampliamente distribuida en las zonas áridas y semiáridas del país. Se caracteriza por sus altos contenidos de carvacrol y timol, compuestos mayoritarios de este aceite esencial, mismos que han demostrado tener actividades antioxidante y antimicrobiana (Portillo et al., 2012; Reyes et al., 2016; Chacon et al., 2022). Recientemente, el AEO ya se está aplicando de forma experimental como conservante natural en algunos productos cárnicos como: mortadela de pavo (Lastra-Vargas et al., 2023), carne de cerdo (Mantzourani et al., 2022), pechugas de pollo (Herrera-Balandrano et al., 2020) y carne de bovino (Reynoso-Escobedo et al., 2023), en donde se resalta su efectividad contra la disminución de microorganismos patógenos como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. y coliformes. Con base en lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del aceite esencial de orégano (*Lippia berlandieri* Schauer) sobre las características microbiológicas del chorizo mexicano.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Se obtuvo aceite esencial de orégano (*Lippia berlandieri* Schauer) de la empresa Natural Solutions SMI (Cd. Jiménez, Chihuahua) y de acuerdo con un estudio previo, de colaboradores de la presente investigación, está compuesto por 65.2 % carvacrol, 10.99 % p-cimeno y 10.26 % timol (Reynoso-Escobedo et al., 2023). Para la elaboración del chorizo, carne de cerdo y lardo se adquirieron en un mercado local del Estado de México.

Para el análisis microbiológico se utilizaron placas Petrifilm 3M® para conteo de mesófilos aerobios, para conteo de bacterias ácido lácticas y para conteo de coliformes totales. Los reactivos utilizados para la elaboración de agua peptonada fueron de grado analítico, cloruro de sodio (J.T. Baker, Estados Unidos) y peptona (Difco™, Estados Unidos).

2.2 Procedimiento Experimental

Se establecieron cuatro dosis de AEO: 0, 50, 75 y 100 mg de AEO por cada kg de chorizo mexicano, considerando 1, 4 y 7 días de almacenamiento. Para la elaboración del chorizo, la carne y el lardo se molieron en un molino Torrey de acero inoxidable con un disco de 8 mm de diámetro, enseguida se mezcló con las especias (orégano, comino y ajo) y las sales (NaCl y nitrato de sodio), posteriormente se agregó el vinagre, se mezcló hasta obtener una mezcla homogénea. Finalmente se adicionó la cantidad de AEO correspondiente a cada tratamiento por aspersión, luego la mezcla se embutió en una tripa natural y se realizaron atadas cada 15 cm con hilo de uso alimenticio, la emulsión del aceite se realizó previamente con Tween 20 (Sigma, Estados Unidos) de acuerdo con lo sugerido por Sánchez-Zamora et al. (2022) y Herrera-Balandrano et al. (2020). Los tratamientos fueron almacenados a temperatura de cuarto (~25 °C, HR 75 %). Las variables de respuesta analizadas fueron el pH, la pérdida de peso y los conteos microbiológicos de mesófilos aerobios, coliformes totales y bacterias ácido lácticas.

Preparación de la emulsión de aceite esencial

Para facilitar la dispersión del AEO en la pasta de chorizo, fue emulsificado con Tween 20 en una relación 50:50 (AEO:emulsificante). Esta relación se determinó considerando las recomendaciones de Herrera-Balandrano et al. (2020) y con base en la norma general para los aditivos alimentarios (CODEX STAN 192-1995; revisión 2019) para que los límites permitidos de Tween 20 no excedieran el límite máximo (5,000 mg/kg).

Formulación de chorizo mexicano

La formulación de chorizo consistió en 700 g de recorte magro o pulpa de cerdo, 300 g de lardo de cerdo, 20 g de sal común de grano fino, 5 g de sal de cura, 20 g de pimentón en polvo, 2 g de ajo en polvo, 2 g de orégano en polvo, 2 g de comino en polvo y 50 mL de vinagre blanco de alcohol de caña.

2.3 Análisis Fisicoquímicos

Se midió el pH a los días 1, 4 y 7 de almacenamiento (D1, D4 y D7, respectivamente) utilizando un potenciómetro de punción modelo HI981036 (Hanna® Instruments, Estados Unidos), calibrado con una solución buffer pH 7.0 y pH 4.0. Así mismo, se evaluó la pérdida de peso mediante el registro del peso en gramos en los días de evaluación con una balanza digital (Mettler Toledo XS104, Estados Unidos) y posteriormente se calculó la pérdida de peso con la siguiente fórmula (Ec. 1):

$$\%PP = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

P₁: peso inicial

P₂: peso final

2.4 Evaluación microbiológica

Se realizaron análisis de coliformes totales, mesófilos aerobios y bacterias ácido lácticas (BAL) utilizando 3M placas Petrifilm™. El análisis microbiológico se realizó por triplicado siguiendo las indicaciones y especificaciones que indican la NOM-110-SSA1-1994, para lo cual se pesaron 10 g de chorizo y se licuaron con 90 mL de una solución estéril de agua peptonada al 0.1 % (p/v) en una licuadora estéril durante 1 min a velocidad baja alcanzando una concentración final de 10 % p/v. Cada uno de los microorganismos que se utilizaron se respetaron las indicaciones del fabricante según la Guía de interpretación de 3M Placas Petrifilm™ (2017) al día 1, 4 y 7 del almacenamiento (D1, D4 y D7, respectivamente) a temperatura ambiente (25 °C).

2.5 Diseño experimental

Cada análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento. Se estableció un diseño experimental en bloques al azar con arreglo factorial, siendo los factores por evaluar: la dosis de AEO (0, 50, 75 y 100 mg/kg) y el tiempo de almacenamiento (D1, D4 y D7). Cada unidad experimental estuvo conformada por 1 kg de chorizo mexicano y se establecieron tres bloques con diferentes lotes de carne. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) con el software SAS (Statistical Analysis Systems) ver. 9.3. Se consideró existe una diferencia significativa cuando el valor p es menor o igual a 0.05.

3. Resultados y discusión

3.1 Pruebas fisicoquímicas

En la Tabla 1 se aprecian los porcentajes de pérdidas de peso, que se presentó en cada muestra experimental durante los días 1, 4 y 7 de almacenamiento. La pérdida de peso fue afectada significativamente ($p \leq 0.05$) por el tiempo de almacenamiento, es decir, se incrementa con respecto al tiempo. La muestra que contenía 50 mg de AEO presentó menor pérdida de peso (37 % pérdida de peso) al día 7 en comparación con las otras muestras, no obstante, la adición del AEO a las muestras de chorizo mexicano no resultó en cambios significativos para la pérdida de peso ($p > 0.05$).

Tabla 1. Valores de % pérdida de peso de muestras experimentales de chorizo mexicano adicionado con AEO
Table 1. Values of % weight loss of experimental Mexican chorizo samples added with AEO

AEO Adicionado	Tiempo		
	Día 1 (D1)	Día 4 (D4)	Día 7 (D7)
AEO ₀	14.9 ± 0.01	28.6 ± 0.02	37.3 ± 0.02
AEO ₅₀	12.5 ± 0.03	25.6 ± 0.07	32.8 ± 0.09
AEO ₇₅	14.4 ± 0.02	28.3 ± 0.04	36.4 ± 0.03
AEO ₁₀₀	14.7 ± 0.02	29.3 ± 0.02	37.6 ± 0.03

*Se presentan medias ± desviación estándar, n = 3.

**Valor p respecto a AEO adicionado = 0.10. Valor p respecto al Día de almacenamiento ≤ 0.0001. Valor p respecto a la interacción AEO adicionado*Tiempo = 0.99.

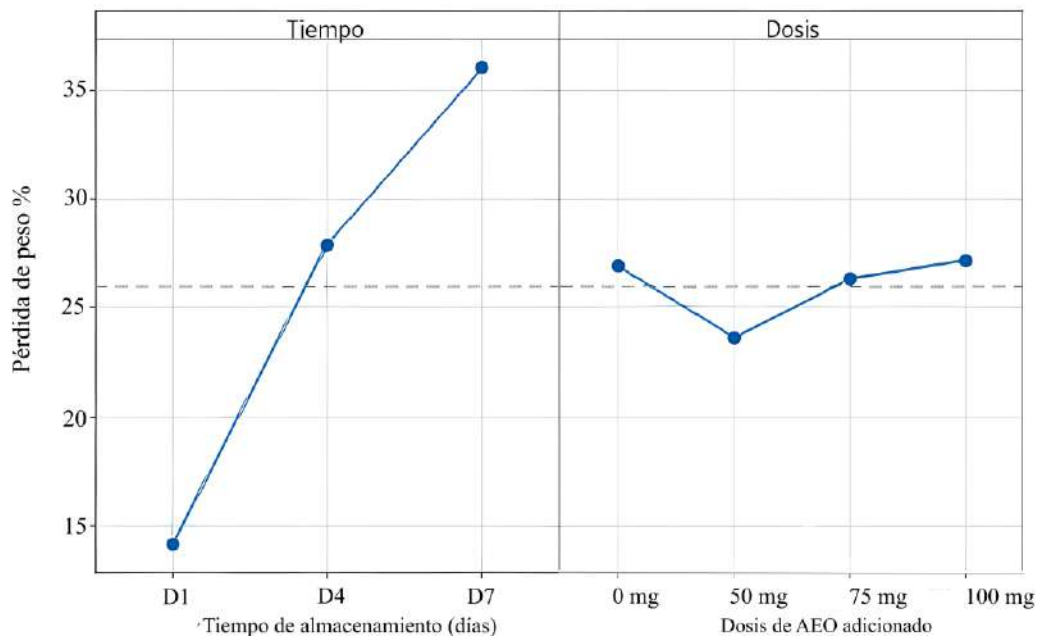


Figura 1 Gráfica de efectos principales del tiempo (D1, D4 y D7) y la dosis de AEO adicionado sobre la pérdida de peso de chorizo mexicano.

Figure 1 Graph of main effects of time (D1, D4 and D7) and the dose of AEO added on weight loss on Mexican Chorizo.

En la figura 1 se observa que el efecto principal del tiempo de almacenamiento sobre la pérdida de peso en el chorizo aumenta, mientras que la dosis de AEO no muestra un efecto principal claro dado que los resultados son estadísticamente similares en todas las concentraciones de AEO, por lo que el AEO no influye en la pérdida de peso de este producto.

Es importante mencionar que la pérdida de peso está relacionada con la capacidad de retención de agua (CRA) lo cual depende a su vez del descenso de pH. Dado que a mayor tiempo de almacenamiento la pérdida de peso tiende a aumentar (Fig. 1) mientras que el pH tiende a disminuir (Fig. 2). Mientras más alejado esté el pH del punto isoeléctrico de las proteínas del músculo (pH = 5.8), más agua se retendrá (León et al., 2017).

En cuanto a los resultados de pH (Tabla 2) se mostró diferencia significativa ($p < 0.05$) respecto al tiempo de almacenamiento (día 1, día 4 y día 7). Es decir, a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento el pH disminuye. La muestra que contenía 75 mg de AEO mostró el valor más bajo de pH en el día 1 (pH = 5.40) mientras que las muestras que contenían 50 y 100 mg de AEO obtuvieron valores de pH de 5.48 en el mismo día. Para el día 7 de almacenamiento, el valor más bajo de pH (pH = 4.48) lo obtuvo la muestra que contenía 75 mg de AEO, mientras que el valor más alto en ese mismo día lo obtuvo la muestra que contenía 50 mg de AEO con un pH = 4.65.

Tabla 2 Valores de pH en muestras experimentales de chorizo mexicano adicionado con AEO
Table 2 pH values in experimental Mexican chorizo samples added with AEO

AEO Adicionado	Tiempo		
	Día 1 (D1)	Día 4 (D4)	Día 7 (D7)
AEO ₀	5.41 ± 0.05	5.32 ± 0.04	4.52 ± 0.23
AEO ₅₀	5.48 ± 0.30	5.26 ± 0.06	4.65 ± 0.20
AEO ₇₅	5.40 ± 0.22	5.35 ± 0.09	4.48 ± 0.09
AEO ₁₀₀	5.48 ± 0.26	5.29 ± 0.06	4.62 ± 0.12

*Se presentan medias ± desviación estándar, n = 3.

**Valor p respecto a AEO adicionado = 0.68. Valor p respecto al Tiempo ≤ 0.0001. Valor p respecto a la interacción AEO adicionado*Tiempo = 0.96.

En la Fig. 2 se muestra el efecto principal del tiempo de almacenamiento sobre el pH en las muestras experimentales de chorizo, el cual tiende a disminuir a mayor tiempo de almacenamiento, mientras que el efecto principal de la dosis de AEO sobre el pH de las mismas muestras se mantiene constante debido a que los resultados son estadísticamente similares, por lo que en la acidificación del chorizo no influye el AEO.

Es importante mencionar que además del AEO, el chorizo se elaboró con vinagre blanco, el cual es una sustancia ácida (pH = 2.5 – 3.0) que tiene como objetivo promover el establecimiento de las bacterias ácido lácticas como microbiota dominante y con ello favorecer la conservación y además generar sabores y aromas únicos en el chorizo (Quintero, 2017), por lo que se atribuye al uso de vinagre los valores inferiores a la neutralidad observados en los chorizos experimentales.

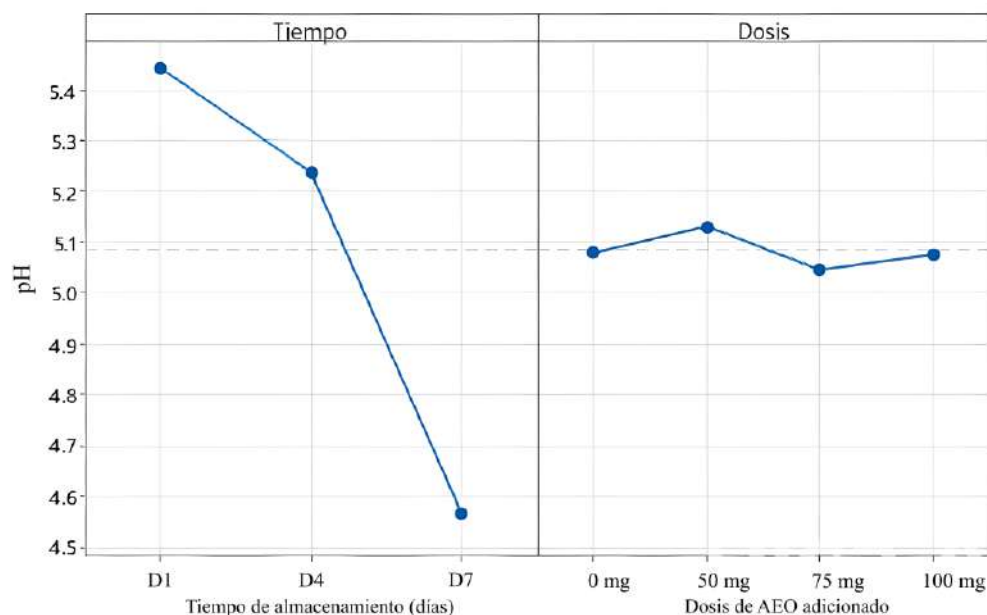


Figura 2 Gráfica de efectos principales del tiempo (D1, D4 y D7) y la dosis de AEO adicionado sobre el pH de chorizo mexicano

Figure 2 Graph of the main effects of time (D1, D4 and D7) and the dose of AEO added on pH of Mexican chorizo.

De acuerdo con lo reportado por Mantzourani et al. (2022) la actividad antimicrobiana de los aceites esenciales de tomillo y orégano, aplicados en carne de cerdo cruda (albóndigas) y almacenadas durante 7 días a 4 °C, aumentó cuando el pH disminuyó. Esto sugiere un efecto sinérgico entre la acidificación del producto y la adición de aceites esenciales, favoreciendo la conservación del alimento.

Los cambios observados en la disminución del pH con respecto al tiempo, Fig. 2, se deben a la producción de ácido láctico por parte de las bacterias ácido lácticas, como se muestra en la Fig. 3 a medida que el tiempo de almacenamiento transcurre la población de BAL incrementó. Autores como Lepecka et al. (2024) y Luan et al. (2021) coinciden en que las BAL pueden producir ácidos orgánicos, como un resultado natural de su metabolismo, contribuyendo así a reducir el pH de las muestras.

3.2 Evaluación microbiológica

La Tabla 3 muestra los conteos microbiológicos de bacterias ácido lácticas (BAL) (log UFC/g) realizados en las muestras de esta investigación. Al día 1 de almacenamiento todas las muestras de chorizo obtuvieron 5 log UFC/g de BAL, al día 4 los conteos aumentaron a 6 log UFC/g y al día 7 de almacenamiento los conteos se mantuvieron en 6 log UFC/g con mínimas variaciones en los resultados respecto al AEO adicionado, siendo el valor más alto 6.17 log UFC/g de la muestra que contenía 50 mg de AEO y el valor más bajo 6.06 log UFC/g para la muestra testigo que no contenía

AEO. Después del ajuste del modelo estadístico factorial se obtuvo que el desarrollo de las BAL fue significativo en el factor tiempo ($p \leq 0.05$); sin embargo, no mostró diferencia significativa entre las dosis de AEO adicionado.

Tabla 3 Recuento de bacterias ácido lácticas (log UFC/g) en chorizo mexicano adicionado con AEO
Table 3 Lactic acid bacteria count (log CFU/g) in Mexican chorizo added with AEO

AEO Adicionado	Tiempo		
	Día 1 (D1)	Día 4 (D4)	Día 7 (D7)
AEO ₀	5.14 ± 0.17	6.08 ± 0.08	6.06 ± 0.17
AEO ₅₀	5.13 ± 0.22	6.17 ± 0.13	6.17 ± 0.10
AEO ₇₅	5.18 ± 0.14	6.14 ± 0.11	6.15 ± 0.09
AEO ₁₀₀	5.09 ± 0.10	6.15 ± 0.08	6.08 ± 0.16

Se presentan medias ± desviación estándar, n = 3.

**Valor p respecto a AEO adicionado = 0.51. Valor p respecto al Tiempo ≤ 0.0001 . Valor p respecto a la interacción AEO adicionado*Tiempo = 0.95.

En la Fig. 3, el efecto principal del tiempo tiende a aumentar del día 1 al día 4 sobre el conteo de BAL, posteriormente se observa un efecto constante a partir del día 4 hasta el día 7, esto podría deberse a que el crecimiento microbiano de BAL obtuvo su máximo crecimiento en ese lapso. Por otra parte, en el lado derecho de la Figura 3 se observa el efecto principal de las diferentes dosis de AEO sobre el conteo de BAL, este efecto se muestra constante sobre la media (5.8 log UFC/g), por lo que la adición del AEO no influye en el desarrollo de BAL dado que estadísticamente los resultados son similares.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Cravero et al. (2020), en donde el aceite esencial de naranja no tuvo efecto bactericida y/o bacteriostático sobre el crecimiento de las bacterias ácido lácticas en la elaboración de yogurt. Por otra parte, Reynoso-Escobedo et al. (2023) encontraron que el aceite esencial de orégano promueve las BAL como también hongos y levaduras a los 15 días en carne de bovino, con lo que se obtiene que las BAL a pesar de ser Gram-positivas, resultan ser muy resistentes contra la acción antimicrobiana de los aceites esenciales.

Durante los procesos de fermentación, la viabilidad de las BAL es un factor importante que afecta la seguridad del producto final. Una alta acidez en los alimentos puede proteger a los consumidores de los patógenos transmitidos por los alimentos. Los microorganismos pueden producir un amplio espectro de ácidos orgánicos, como lo son las BAL que producen ácido láctico (Lopusiewicz et al., 2022).

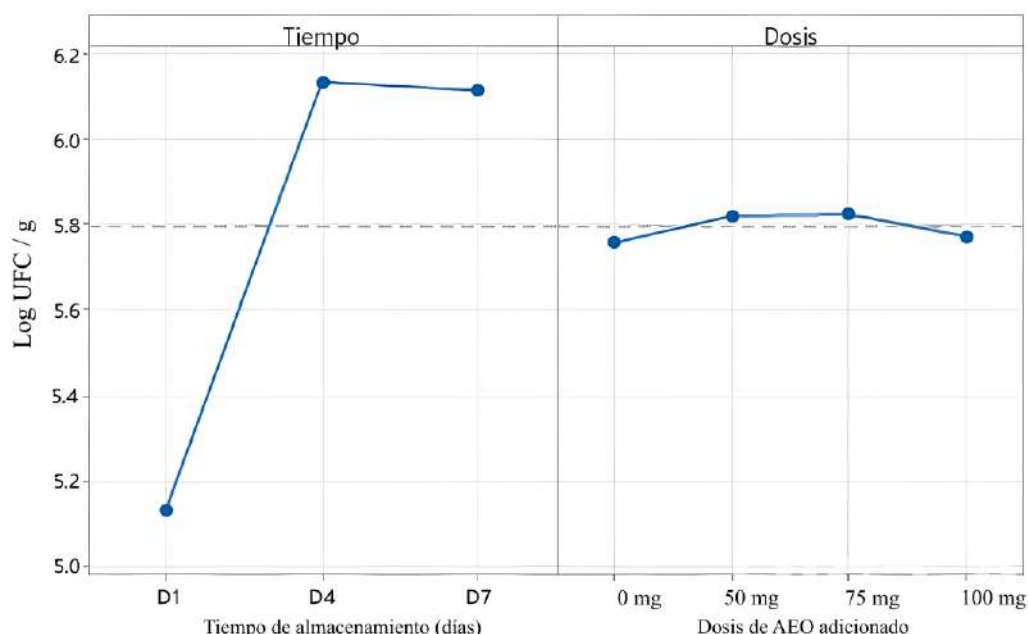


Figura 3 Gráfica de efectos principales del tiempo (D1, D4 y D7) y la dosis de AEO adicionado sobre el conteo de bacterias ácido lácticas en chorizo mexicano.

Figure 3 Graph of the main effects of time (D1, D4 and D7) and the dose of AEO added on the count of lactic acid bacteria in Mexican chorizo.

Brugini et al. (2018) demostraron que el pH óptimo para el crecimiento bacteriano en la carne se encuentra próximo a la neutralidad, por ende, la producción de ácido láctico es más efectiva en inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos como lo es *Listeria monocytogenes* cuando alcanza valores de pH de entre 4.5 a 4.6. En las BAL un pH < 4 se considera un factor inhibitorio que afecta la viabilidad debido a la reducción del pH intracelular, el cual difunde a través de la membrana celular, provocando un colapso del gradiente electroquímico que tiene un efecto bacteriostático o bactericida. No obstante, existen BAL que pueden sobrevivir a un pH < 4 y son capaces de pasar a través del tracto digestivo, lo cual es una característica probiótica (Swetwathana y Visessanguan, 2015).

Bacterias mesófilas aerobias

El crecimiento de las bacterias mesófilas aerobias mostró una diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en el día 1 en contraste con el día 4 y 7 de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C), no obstante, no existe diferencia significativa ($p > 0.05$) entre el control (AEO₀) y las muestras que contenían AEO. Como se puede observar en las Tablas 3 y 4, los recuentos de bacterias ácido lácticas (BAL) y bacterias mesófilas aerobias muestran un patrón similar, destacando que las BAL fueron el grupo de microorganismos predominante en las muestras de chorizo mexicano analizadas, lo anterior coincide con lo reportado por González et al. (2012).

Tabla 4 Recuento de bacterias mesófilas aerobias (log UFC/g) en chorizo mexicano adicionado con AEO
Table 4 Aerobic mesophilic bacteria count (log CFU/g) in Mexican chorizo added with AEO

AEO Adicionado	Tiempo		
	Día 1 (D1)	Día 4 (D4)	Día 7 (D7)
AEO ₀	6.33 ± 0.04	6.83 ± 0.17	6.94 ± 0.05
AEO ₅₀	6.28 ± 0.05	6.73 ± 0.22	7.01 ± 0.026
AEO ₇₅	6.33 ± 0.04	6.83 ± 0.22	7.02 ± 0.05
AEO ₁₀₀	6.20 ± 0.10	6.75 ± 0.24	7.00 ± 0.05

Se presentan medias ± desviación estándar, n = 3.

**Valor p respecto a AEO adicionado = 0.59. Valor p respecto al Tiempo ≤ 0.0001. Valor p respecto a la interacción AEO adicionado*Tiempo = 0.87.

El análisis microbiológico para bacterias mesófilas aerobias representa una perspectiva global del contenido de microorganismos viables en el chorizo mexicano. En el grupo de mesófilos aerobios se incluyen todos los microorganismos capaces de desarrollarse en presencia de oxígeno a una temperatura comprendida entre 20 y 45 °C, los cuales pueden ser patógenos o no. En este grupo de microorganismos no se observó efecto antimicrobiano significativo por parte del AEO, esto quizá se deba a la presencia del vinagre y por ende la reducción de pH que contribuyeron a enmascarar el efecto del AEO, o funcionan sinérgicamente entre ellos mismos, para reducir la carga microbiana, resultados similares obtuvieron Siroli *et al.* (2020) al evaluar la actividad antimicrobiana de aceite esencial de orégano, romero y enebro en el lomo de cerdo marinado con limón y cerveza.

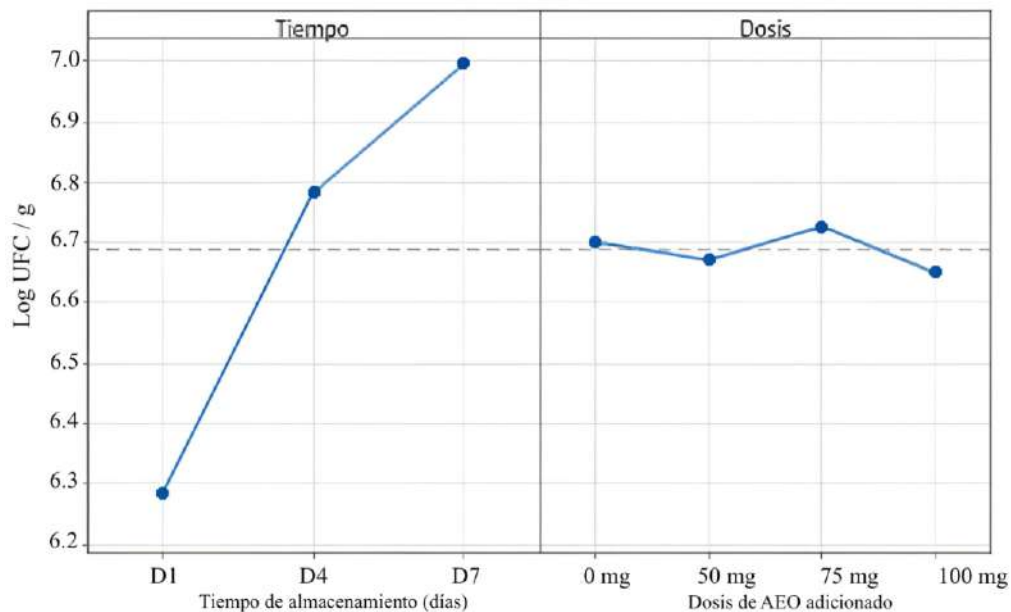


Figura 4 Gráfica de efectos principales del tiempo (D1, D4 y D7) y la dosis de AEO adicionado sobre el conteo de mesófilos aerobios en chorizo mexicano

Figure 4 Graph of the main effects of time (D1, D4 and D7) and the dose of AEO added on the aerobic mesophile count in Mexican chorizo

Como se muestra en la Fig. 4, los conteos de bacterias mesófilas aerobias (log UFC/g) tuvieron un efecto principal creciente respecto al tiempo, es decir, los conteos de mesófilas aerobias aumentaron su población conforme transcurrían los días de almacenamiento, mientras que la adición de AEO mostró un efecto constante sin variaciones entre las diferentes dosis de AEO utilizadas en este estudio, por lo anterior, el AEO no influyó en el desarrollo de BAL en el chorizo mexicano.

Las bacterias mesófilas aerobias se encontraron en cantidades promedio de 6 log UFC/g en el día 1 y aumentaron hasta 7 log UFC/g a excepción de la muestra control que no contenía AEO. Sin embargo, se mantuvieron sin diferencia significativa ($p > 0.05$) respecto a la dosis de AEO adicionado, estos valores son mayores a los que establece la NOM-213-SSA1-2018 para productos cárnicos. Estos valores se encuentran cercanos a los reportados por González Tenorio et al. (2012) en donde evaluaron muestras de chorizos de diferentes centros de distribución en México los cuales contaban con valores medios de entre 7 y 9 log UFC/g de microorganismos mesófilos. Sin embargo, el AEO no tuvo efecto antimicrobiano particular contra este grupo de microorganismos, esto coincide con los reportado por Mantzourani (2022) quienes no observaron efectos del AEO sobre los conteos de microorganismos mesofilos en carne de cerdo cruda almacenada en refrigeración (4 °C).

Coliformes totales

Los conteos de bacterias coliformes mostraron un incremento del día 1 al día 4 en las muestras que se adicionaron con 0 y 50 mg/kg de AEO mientras que las muestras que contenían 75 y 100 mg/kg de AEO exhibieron un descenso en el conteo de coliformes con respecto al mismo periodo de tiempo, de tal manera que el AEO₀ y AEO₅₀ son estadísticamente diferentes a los tratamientos elaborados con 75 y 100 AEO mg/kg (Fig. 5). Estos resultados sugieren que las dosis mayores de AEO empleadas en este estudio generaron una inhibición de los coliformes totales del día 1 al día 7, pasando de 4.18 log UFC/g a 2.79 log UFC/g para el tratamiento AEO₇₅ y de 4.18 log UFC/g a 2.76 log UFC/g para el tratamiento AEO₁₀₀ (Tabla 5).

Tabla 5 Recuento de coliformes totales (log UFC/g) en chorizo mexicano adicionado con AEO

Table 5 Total coliform count (log CFU/g) in Mexican chorizo added with AEO

AEO Adicionado	Tiempo		
	Día 1 (D1)	Día 4 (D4)	Día 7 (D7)
AEO ₀	4.22 ± 0.11	4.78 ± 0.14	4.03 ± 0.10
AEO ₅₀	4.21 ± 0.11	4.63 ± 0.27	3.97 ± 0.03
AEO ₇₅	4.18 ± 0.10	3.66 ± 0.07	2.79 ± 0.11
AEO ₁₀₀	4.18 ± 0.08	3.44 ± 0.19	2.76 ± 0.06

Se presentan medias ± desviación estándar, n=3.

**Valor p respecto a AEO adicionado ≤ 0.0001. Valor p respecto al tiempo ≤ 0.0001. Valor p respecto a la interacción AEO adicionado*Tiempo ≤ 0.0001.

Para el día 7 de almacenamiento, se observó una disminución (Fig. 5) en los recuentos de coliformes totales en todos los tratamientos, no obstante, para los primeros dos tratamientos (AEO₀ y AEO₅₀) la disminución fue menor de 0.2 log UFC/g mientras que para los tratamientos AEO₇₅ y AEO₁₀₀, que contenían las dosis mayores de AEO (75 y 100 mg respectivamente), tuvieron una disminución de 2.2 log UFC/g respecto al día 1 y de 1 log UFC/g en comparación con el día 4 de evaluación observándose una interacción significativa entre los factores dosis y tiempo.

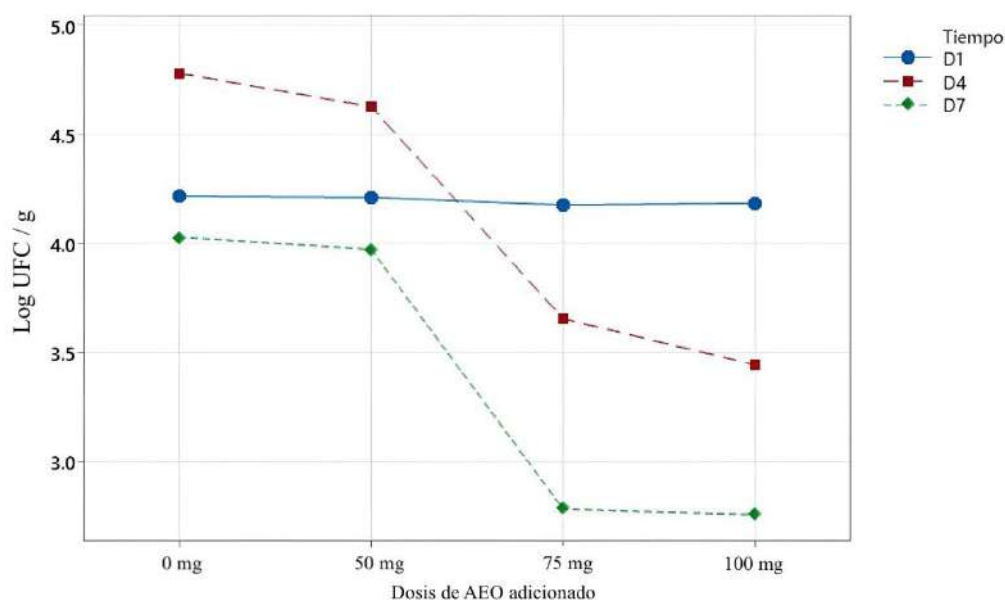


Figura 5 Gráfica de interacción de los factores tiempo*dosis sobre el conteo de coliformes totales en chorizo mexicano adicionado con AEO.

Figure 5 Graph of interaction of time*dose factors on total coliform count in Mexican chorizo added with AEO.

El recuento de coliformes totales permite saber cuán posible es la contaminación de la muestra, durante el proceso de elaboración de los productos cárnicos, respecto al manejo por parte de los manipuladores. Este conteo total de coliformes es importante también debido a la posibilidad de encontrar bacterias como *E. coli* (Perlera de Escalante et al., 2020). En general, la característica lipofílica de los aceites esenciales les permite interactuar con los lípidos de las membranas celulares de las bacterias. Esta interacción en consecuencia afecta a la permeabilidad celular alterando las estructuras y el funcionamiento celular, lo que provoca la muerte celular (Hou et al., 2022).

En México no se cuenta con criterios específicos para coliformes totales, pero la International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF), Swanson, K.M, (2011) recomienda valores por debajo de 10^2 UFC/g como aceptables en alimentos. El AEO en su concentración más alta (100 mg/kg) logró disminuir hasta 2.76 log UFC/kg al día 7 de almacenamiento a temperatura ambiente, lo cual lo hace un bioconservador viable para el chorizo mexicano.

4. Conclusiones

La adición de AEO (*Lippia berlandieri* Schauer) en la formulación de chorizo mexicano no tuvo impacto significativo en la pérdida de peso y en la disminución de pH. El análisis microbiológico mostró que el AEO no tuvo efecto alguno en las bacterias mesófilas aerobias y en las BAL sin embargo la adición de concentraciones de 75 y 100 mg de AEO por cada kg de chorizo lograron reducir notablemente la población de coliformes totales, especialmente al séptimo día de almacenamiento. Estos resultados confirman que el AEO puede actuar como un potencial bioconservador en el chorizo mexicano.

Aunque existen diversos estudios que muestran el potencial uso de los aceites esenciales como bioconservadores se requiere que estos estudios se realicen en las matrices alimenticias que resultan más complejas como lo son las que conforman a los embutidos cárnicos.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, O.R.C.S., E.F.G.; **Metodología**, G.M.Z., E.F.G.; **Software**, O.R.C.S., E.F.G.; **Validación**, G.M.Z., E.F.G.; **Análisis formal**, O.R.C.S., J.A.R.D.A., G.M.Z., E.F.G.; **Investigación**, O.R.C.S., E.F.G.; **Recursos**, E.F.G.; **Conservación de datos**, O.R.C.S., E.F.G.; **Redacción-redacción del borrador original**, O.R.C.S., J.A.R.D.A.; **Redacción-revisión y edición**, J.A.R.D.A., G.M.Z., E.F.G.; **Visualización**, E.F.G.; **Supervisión**, E.F.G.; **Administración del proyecto**, E.F.G.; **Obtención de financiación**, E.F.G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

5. Referencias

- Becerril, A., Dublan, O., Dominguez, A., Cotero, D., & Quintero, B. (2019). La calidad sanitario del chorizo rojo tradicional que se comercializa en la Ciudad de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 10 (1): 172-185. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i1.4344>
- Ceja-Farias, T. (2022). El consumidor y los productos cárnicos deteriorados . *Revista de Microbiología y educación saludable*. 4(1): 106-107. <http://journalmhe.org/ojs3/index.php/jmhe/article/view/23>
- Chacón-Vargas, K. F., Sánchez-Torres, L. E., Chávez-González, M. L., Adame-Gallegos, J. R., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2022). Mexican Oregano (*Lippia berlandieri* Schauer and *Poliomintha longiflora* Gray) Essential Oils Induce Cell Death by Apoptosis in Leishmania (*Leishmania*) mexicana Promastigotes. *Molecules*, 27(16): 5183. <https://doi.org/10.3390/molecules27165183>
- CODEX STAN 192, Norma general para los aditivos alimentarios. Normas internacionales de los alimentos. Revisión 2019. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/es/>
- COMECARNE. (2023). <https://comecarne.org/compendio-estadistico-2023/>

- Cravero, C., Juncos, N., & Olmedo, R. (2020). El rol de los aceites esenciales en los procesos fermentativos: elaboración de yogurt con aceite esencial de naranja. *Nexo Agropecuario*. 8 (2):104-110. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/nexoagro/article/view/30821>
- Cruz-Gil, M., Ortiz-Rodríguez, L., Ramírez-Vargas, T., Toledo-González, K., Ramírez-Moreno, E., & Guillen-Velasco, S. (2022). ¿Qué microorganismos se encuentran en chorizos comercializados en México? *Educación Y Salud Boletín Científico Instituto De Ciencias De La Salud Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo*, 10(20):288-292. <https://doi.org/10.29057/icsa.v10i20.7270>
- Enriquez, M., Serrano, G., Ricaurte, P., & Cuadrado, D. (2024). Effect of Essential Oils from Aromatic Plants on the Preservation of Sausages. *Revista Sociedad Científica del Paraguay*. 29 (1):196-225. <https://doi.org/10.32480/rscp.2024.29.1.196>
- Fernández-Fernández, E., Romero-Rodríguez, M. A., & Vázquez-Odériz, M. L. (2001). Physicochemical and sensory properties of Galician chorizo sausage preserved by refrigeration, freezing, oil-immersion, or vacuum-packing. *Meat Science*. 58(1):99–104. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00140-6)
- Gutierrez, R., Ponce, E., Braña, D., & Perez, M. (2020). Prevalencia de microorganismos patógenos en carne de cerdo al menudeo en supermercados de la Ciudad de México. *Nacameh*. 14 (1): 31-40. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7503493>
- Herrera-Balandrano, D., Martínez-Rojas, D., Luna-Maldonado, A., Gutiérrez-Soto, G., Hernández-Martínez, C., Silva-Vázquez, R., Flores-Girón, E., Quintero-Ramos, A., & Méndez-Zamora, G. (2020). Conservación de pechugas de pollo con aceite esencial de orégano mexicano. *Biotechnia*. 22(2):119-127. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i2.1253>
- Hou, T., Sankar-Sana, S., Li, H., Xing, Y., Nanda, A., Netala, V., & Zhang, Z. (2022). Essential oils and its antibacterial, antifungal and anti-oxidant activity applications: A review. *Food Boiscience*. 47. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101716>
- International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF), Swanson, K.M. (2011). Meat Products. En *Microorganisms in Foods 8*:75-93. Boston MA. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9374-8_8
- Lastra-Vargas, L., Hernández-Nava, R., Ruíz-González, N., Jiménez-Munguía, M., López-Malo, A., & Palou, E. (2023). Oregano essential oil as an alternative antimicrobial for the control of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* in Turkey mortadella during refrigerated storage. *Food Chemistry Advances*, 2: 100314. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100314>
- Lepecka, A., Szymanski, P., & Okon, A. (2024). Indigenous Lactic Acid Bacteria as Antioxidant Agents in the Production of Organic Raw Fermented Sausages. *Antioxidants*. 13(11) : 1-16. <https://doi.org/10.3390/antiox13111305>
- León, C., Orduz, A., & Velandia, M. (2017). Physicochemical composition of meat of sheep, chicken, and pork. *Alimentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 15(2): 62–75. <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/alimen/article/view/2183>
- Lopusiewicz, Ł., Waszkowiak, K., Polanowska, K., Mikołajczak, B., Śmietana, N., Hrebien-Filisińska, A., Sadowska, J., Mazurkiewicz-Zapałowicz, K., & Drożłowska, E. (2022). The Effect of Yogurt and Kefir Starter Cultures on Bioactivity of Fermented Industrial By-Product from *Cannabis sativa* Production—Hemp Press Cake. *Fermentation*. 8 (10): 490. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100490>
- Luan, X., Feng, M., & Sun, J. (2021). Effect of *Lactobacillus plantarum* on antioxidant activity in fermented sausage. *Food Research International*, 144: 110351. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110351>

- Mantzourani, I., Daoutidou, M., Dasenaki, M., Nikolaou, A., Alexopoulos, A., Terpou, A., Thomaidis, N., & Plessas, S. (2022). Plant Extract and Essential Oil Application against Food-Borne Pathogens in Raw Pork Meat. *Foods*, 11(6): 861. <https://doi.org/10.3390/foods11060861>
- Perlara de Escalante, A., Bonilla, J., Ventura, F., & Alvarado, F. (2020). Determinación de la concentración mínima y máxima del extracto de orégano (*Origanum vulgare*) como sustituto natural para preservar productos cárnicos. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*. 9: 47-62. <https://www.camjol.info/index.php/PAYDS/article/view/11855>
- Portillo-Ruiz, M. C., Ávila-Sosa Sánchez, R., Viramontes-Ramos, S., Torres-Muñoz, J. V., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2012). Antifungal Effect of Mexican Oregano (*Lippia berlandieri* Schauer) Essential Oil on a Wheat Flour-Based Medium. *Journal of Food Science*, 77(8): M441-M445. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02821.x>
- Quintero-Salazar, B. (2017). ¿Por qué son famosos los chorizos de Toluca? Percepción, reputación, identidad y tradición culinaria de un embutido que llegó para quedarse. *Nacameh*. 11 (2): 33-49. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6307676>
- Redondo-Solano, M., Valenzuela-Martínez, C., Cordero-Calderon, V., & Araya-Morice, A. (2023). Calidad microbiológica de embutidos crudos: estudio del caso en Latinoamérica. *Revista de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición*. 73 (3): 201-213. <https://doi.org/10.37527/2023.73.3.004>
- Reyes-Jurado, F., López-Malo, A., & Palou, E. (2016). Antimicrobial Activity of Individual and Combined Essential Oils against Foodborne Pathogenic Bacteria. *Journal of Food Protection*, 79 (2): 309-315. ISSN 0362-028X. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-392>
- Reynoso-Escobedo, H., Luna-Maldonado, A., García-Treviño, N., Sinagawa-García, S., Rico-Costilla, D., Flores-Girón, E., & Méndez-Zamora, G. (2023). Efecto de aceite de orégano en la carne de bovino. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1): 408-417. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.55>
- Sánchez-Zamora, N., Cepeda-Rizo, M. D., Tamez-Garza, K. L., Rodríguez-Romero, B. A., Sinagawa-García, S. R., Luna Maldonado, A. I., Flores-Girón, E., & Méndez-Zamora, G. (2022). Efecto del aceite de orégano en las propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales del queso panela. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(1):258-271. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i1.5567>
- Sakkas, H., & Papadopoulou, C. (2017). Antimicrobial Activity of Basil, Oregano, and Thyme Essential Oils. *J. Microbiol. Biotechnol.* 27 (3): 429-438. <https://doi.org/10.4014/jmb.1608.08024>
- Siroli, L., Baldi, G., Soglia, F., Bukvicki, D., Patrignani, F., Petracci, M., & Lanciotti, R. (2020). Uso de aceites esenciales para aumentar la seguridad y la calidad del lomo de cerdo marinado. *Foods*. 9 (8):1-21. <https://www.virtualpro.co/articulos/el-uso-de-aceites-esenciales-para-aumentar-la-seguridad-y-la-calidad-del-lomo-de-cerdo-marinado-141191>
- Swetwathana, A., & Visessanguan, W. (2015). Potential of bacteriocin-producing lactic acid bacteria for safety improvements of traditional Thai fermented meat and human health. *Meat Science*, 109: 101-105. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.030>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Solubility of Part-Baked Bread Gluten Protein During Frozen Storage

Solubilidad de las proteínas del gluten en pan pre-horneado durante
el almacenamiento en congelación

Ana Irene Ledesma-Osuna¹, Beatriz Montaña-Leyva¹, José Luis Espinoza-Acosta², Mariela Menchaca-Armenta¹, María Fernanda Amaya-Villalva¹, Guadalupe Amanda López-Ahumada, and Jesús Enrique Gerardo-Rodríguez^{1*}

¹Universidad de Sonora. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Hermosillo, Sonora 83000, México

²Universidad Estatal de Sonora (UES). Navojoa, Sonora, México

*Correspondencia: Correo electrónico: jesusenrique.gerardo@unison.mx (Jesús Enrique Gerardo Rodríguez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.2030>

Recibido: 13 de agosto de 2025; Aceptado: 14 de noviembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Johan Mendoza-Chacón

Abstract

This study investigates how freezing rate and part-baking time affect the solubility of gluten proteins in bread, aiming to improve production in the frozen bakery industry. Bread samples were part-baked for 3 and 6 min, frozen at either slow (0.15 °C/min) or fast (1.45 °C/min) rates and stored at -20 °C for up to 56 days. Every 14 days, samples were analyzed to measure the solubility of low and high molecular weight glutenin (LMW-GLU and HMW-GLU), gliadins, and free thiol content. Statistical analysis (ANOVA) revealed that part-baking time, freezing rate, and frozen storage time significantly influenced protein behavior ($P < 0.01$). LMW-GLU solubility decreased 71.2 % with longer part-baking and frozen storage, while HMW-GLU levels increased 1.5 % under the same conditions, indicating protein aggregation. Free thiol content decreased 14.5 % (0.35 mol SH/g protein), with longer part-baking but was better retained with fast freezing rate. Overall, fast freezing proved to be more effective at preserving protein and bread quality, offering valuable insights for optimizing industrial frozen bread production processes.

Keywords: gluten network, free thiol, protein denaturalization, freezing, part-baked bread

Resumen

Este estudio investiga cómo la velocidad de congelación y el tiempo de pre-horneado afectan la solubilidad de las proteínas del gluten en el pan, con el objetivo de mejorar la producción de la industria de panificación. Las muestras de pan se pre-hornearon durante 3 y 6 min, se congelaron a velocidad lenta (0,15 °C/min) o rápida (1,45 °C/min) y se almacenaron a -20 °C durante 56 días. Cada 14 días, se analizaron las muestras para medir la solubilidad de las gluteninas de bajo y alto peso molecular (GLU-LMW y GLU-HMW), las gliadinas y el contenido de tioles libres. El análisis estadístico (ANOVA) reveló que el tiempo de pre-horneado, la velocidad de congelación y el tiempo de almacenamiento en congelación influyeron significativamente en el comportamiento de las proteínas ($P < 0.01$). La solubilidad del GLU-LMW disminuyó 71.2 % con el pre-horneado y el almacenamiento en congelación prolongados, mientras que los niveles de GLU-HMW aumentaron 1.5 % en las mismas condiciones, lo que indica agregación proteica. El contenido de tioles libres disminuyó con un pre-horneado más prolongado 14.5 % (0.35 mol SH/g proteína), pero se conservó mejor con una congelación rápida. En general, la congelación rápida demostró ser más eficaz para preservar las proteínas y la calidad del pan, lo que ofrece información valiosa para optimizar los procesos de producción industrial de pan congelado.

Palabras clave: red de gluten, tioles libres, desnaturalización de la proteína, congelación, pan pre-horneado

1. Introduction

Frozen dough bakery products and frozen part-baked bread have gained increasing popularity (Halagarda, 2017). Among these two categories, the part-baked bread segment alone was valued at approximately US\$5.59 billion in 2024 and is projected to grow to US\$9.33 billion by 2032, representing a compound annual growth rate (CAGR) of 6.38 % over the period from 2025 to 2032 (Datamintelligence, 2025). This success is attributed to several advantages over traditional breadmaking methods, including a wider distribution area, improved efficiency, and reduced time and labor in bread production. However, this process presents challenges, such as ice crystal formation, water redistribution, loss of yeast viability, and protein denaturation.

Unlike frozen dough, part-baked bread process benefits from a completed fermentation stage, preventing loss of yeast viability. Nevertheless, these factors still affect the functional properties of dough, resulting in quality deterioration in the final product. One of the most impacted quality parameters is the dough's fermentative capability, which declines due to reduced gluten network strength and stability, impairing gas retention (Castillo-Arias et al., 2024). Gluten is composed of glutenin (20 %) and gliadin (80 %), which are responsible for the viscoelastic properties of dough. Despite being present in a lower proportion, glutenin plays a crucial role in determining gluten quality, as they form a structural backbone through terminal linkages via disulfide bonds in gluten proteins. Glutenin consists of low molecular weight glutenin subunits (LMW-GLU) and high molecular weight glutenin subunits (HMW-GLU), with the latter ranging from approximately 77 to 160 kDa. HMW-GLU has been strongly correlated with dough quality (Ding et al., 2024). Osborne, (1907) classified wheat proteins based on their solubility in different solvents, categorizing gliadin and LMW-GLU as soluble in alcohol, while HMW-GLU is soluble in acidic solutions.

During frozen storage, ice crystals grow while the overall water balance remains unchanged. Souza-Guimarães et al. (2025) observed ruptures in gas cell membranes, likely caused by mechanical damage to the gluten network due to ice crystal formation. The freezing rate significantly influences gluten structure and yeast viability. Slow freezing rates (<1 °C/min) promote large ice crystal formation, disrupting the gluten network and reducing CO₂ retention capacity (Su et al. 2024). Conversely, fast freezing rates (>1 °C/min) generate smaller crystals during nucleation, causing less damage to gluten proteins. These deterioration processes lead to gluten network weakening, disulfide bond rupture, and undesirable protein modifications (Bai et al., 2022). An adequate freezing rate regulates recrystallization and water distribution, facilitating a rapid transition to the glassy phase. This phase creates a highly viscous medium (10^8 - 10^{12} Pa·s), significantly reducing molecular mobility and restricting chemical reactions (Roos, 2021). The glass transition temperature is a key parameter in food preservation, as it marks the point at which chemical and enzymatic processes stop. This temperature is influenced by various factors, including moisture content and the molecular composition of the food (Mahato et al., 2019).

To mitigate the adverse effects of freezing on part-baked bread, various strategies have been explored, including modifications to process parameters, dough formulation adjustments, and the use of additives (Gaikwad & Arya, 2018). On the other hand, the evaluation of free thiol content (SH) has represented an important indicator of reduction of disulfide bonds on products obtained by these strategies, principally frozen dough and part-baked bread (Wei et al., 2025). This study aims to evaluate the physicochemical changes through the assessment of solubility and free thiol content in gluten proteins (glutenin and gliadin) of dough induced by part-baking time, freezing rate, and frozen storage time.

2. Materials and methods

2.1 Raw material

Wheat of Borlaug variety was obtained from Yaqui Valley, Sonora, and milled using an experimental mill (Brabender Quadrumat Jr. Mill Quadruplex; Brabender Instruments, South Hackensack, NJ, USA) to obtain refined flour. It was reposed for 15 days and sieved to particle size of 200 µm. The characterization was carried out with the following AACC 2000 methods: moisture content (44-01.01), protein content (46-12.01), and ash content (08-01.01). Empirical rheological properties of the flour were evaluated using a farinograph (Brabender Instruments, model 810143, South Hackensack, NJ, USA) (54-21.02), and an alveograph (Chopin Instruments, Villeneuve-La-Garenne, France) (54-30.02). Fresh yeast was provided by Azteca S.A. of C.V from Guadalajara México. Salt and shortening were obtained from a local store in Hermosillo, México.

2.2 Dough preparation

To assess gluten proteins in bread formulation, the following ingredients were used: wheat flour (100 %), shortening (5 %), fresh yeast (3 %), and salt (1.5 %). The ingredients were mixed (National MFG brand mixer, Lincoln NE, US) for 4 min. The amount of water incorporated into the formulation was 61.2 % which was determined based on farinograph analysis. The fermentation was

conducted in a controlled chamber (National MFG brand, Lincoln, NE, US) at 30 °C and 85 % relative humidity (RH) for 60 min following the procedure described by Gerardo-Rodriguez et al. (2021). Subsequently, the fermented dough was divided into 50 g portions and shaped manually to form pieces of bread.

2.3 Part-baking and freezing of dough

The formed dough was part-baked for 3 and 6 min in a convection oven (National MFG, Lincoln NE, US) and 85 % RH at 250 °C. Part-baking times were determined considering different stages of baking, through preliminary experiments. The part-baked bread was cooled for 1 h until 25 °C and packed in hermetic bags. The samples were frozen at -20 °C with slow freezing rate (0.15 °C/min) in a freezer (Frigidaire, model GLFC1526FW, Mississauga, Ont., Canada), or a fast freezing rate (1.45 °C/min) in an ultra-freezer (Thermo Fisher Scientific LCC, model UXF40086A62, Ashville, NC USA) for 56 days. The freezing rate was determined by using a thermocouple attached at the center of the dough to measure the time necessary to reach -20 °C. The samples were freeze-dried every 14 days for evaluation.

2.4 LMW-glutenin and gliadin solubility

Soluble proteins were extracted twice using 1 mL of 50 % propanol solution. Samples were vortexed and centrifuged for 5 min (Rani et al., 2023). Each extraction (supernatant) was collected to analyze protein solubility using a high-performance liquid chromatography (HPLC) system (Agilent 1260 Infinity Quaternary LC System, mod. 240; Palo Alto, CA, USA) equipped with an Agilent 1260 Infinity diode array detector. Protein detection was performed using a BIOSEP-SEC-S 4,000 column (Phenomenex, Torrence, CA) with 5 µm particle size, 7.8-mm diameter, and 200-mm length. The mobile phase was acetonitrile/water (50:50 v/v) with 0.1% trifluoroacetic acid (Lookhart et al., 2003). The column temperature during analysis was 40 °C, and the flow rate was 0.5 mL/min. The chromatograms detected at 210 nm exhibited three elution peaks: the first peak corresponding to soluble polymeric proteins, and the last two peaks associated with monomeric proteins. The analyzed protein fractions included soluble polymeric proteins and gliadins.

2.5 Insoluble protein quantification

The precipitate obtained from the extraction of soluble protein was washed twice with 50 % propanol and dried to form pellets. This fraction corresponded to insoluble proteins (HMW-glutenin). Subsequently, the pellets were pulverized to quantify total protein by Dumas method (AACC, 46-30.01) using a nitrogen determinant (LECO brand model FP-528, Michigan, USA) with a conversion factor of N x 5.7.

2.6 Free thiols content

The free thiol (SH) content of protein in freeze-dried part-baked bread samples was analyzed following the method used by Marti et al. (2017) with modifications. Briefly, 60 mg of samples were

suspended in a solution containing 50 % isopropanol, 80 mM Tris HCl, and Ellman's reagent. Absorbance was recorded at A_{412} and results were expressed as $\mu\text{mol thiol/g}$ protein of flour. Analyses were conducted in triplicate independent experiments.

2.7 Experimental design and statistical analysis

A factorial design of $2 \times 3 \times 5$ was used. The factors and levels were freezing rate (slow 0.15°C/min or fast 1.45°C/min), part-baking time (fresh dough, 3 and 6 min) and frozen storage time (fresh dough, 14, 28, 42 and 56 days). An analysis of variance (ANOVA) with a confidence level of 95 % was performed. The Tukey test was carried out for differences between specific means. Experimental design and statistical analysis were performed using the software SAS 9.4.

3. Results and discussion

3.1 LMW-glutenin and gliadin solubility

The ANOVA results in the effects of freezing rate, part-baking time, and frozen storage time on the solubility of low molecular weight glutenin (LMW-GLU) and gliadins (GLI) indicate a significant effect ($P < 0.01$) of part-baking time, followed by the interaction between freezing rate and frozen storage time, on both glutenin and gliadins.

The impact of part-baking time and frozen storage time on the solubility of LMW-GLU and GLI in part-baked bread is shown in Table 1. Across all frozen storage time, LMW-GLU and GLI decrease with increasing part-baking time. In fresh dough (not stored), LMW-GLU decreased by 31.5 % and 71.2 % after 3 and 6 min of part-baked time, respectively. Similarly, after 14 days of frozen storage, LMW-GLU decreased by 14.2 % and 91.2 % by 3 and 6 min of part-baked time, respectively. This trend remains consistent on 28, 42, and 56 days of frozen storage. This decline is likely attributed to heat-induced denaturation of LMW-GLU proteins. However, no clear tendency was evident regarding the effect of frozen storage time. The weakening of frozen dough during prolonged frozen storage has been evidenced in other studies by viscoelastic tests, which indicate a reduction in fermentative capacity and lower loaf volume in bread made from frozen dough (Carboni et al., 2022).

Regarding the effects of freezing rate on LMW-GLU solubility in part-baked bread, a slower freezing rate was associated with higher solubility at 3 min of part-baking, suggesting reduced glutenin damage. In dough stored for 14 days, yeast cells remain viable, reducing the harmful effects of freezing since intracellular ice crystal formation is minimal. However, as frozen storage progresses, water redistribution leads to dough dehydration, enlarging ice crystals in gas cells and altering the original protein structure (Armenta-Aispuro et al., 2024). This process, known as recrystallization, modifies the number, size, and shape of ice crystals (Jiang et al., 2025), limiting water availability and impairing the formation of inter- and intramolecular bonds. Thus, hydrophilic interactions between proteins become weaker, contributing to further degradations of the gluten network (Li et al., 2023).

After 3 min of part-baking, some yeast viability remains; however, by 6 min, the opposite effect was observed, with rapid freezing proving more beneficial in the absence of yeast. The effects of part-baking time and frozen storage time on gliadin solubility in part-baked bread is shown in Table 1.

Longer part-baking times result in greater solubility loss, decreasing 7.1 and 12 % at 3 and 6 min of part-baking time respectively for not stored dough. This trend was consistent throughout all frozen storage time. This reduction is likely associated with gliadins forming hydrophobic bonds with other proteins, including glutenin, leading to reduced functionality and the formation of a rigid crumb structure. Solubility remains relatively stable in fresh dough and 3 min of part-baking but decreases after 6 min. This suggests that minimal damage occurs in fresh dough, whereas extended thermal treatment induces significant protein denaturation.

Regarding the effects of freezing rate and frozen storage time on gliadin solubility in part-baked bread, fast freezing enhances protein solubility over frozen storage time, whereas slow freezing maintains a constant solubility level. These findings suggest that a slow freezing rate appears to better preserve glutenin stability, making it a potentially favorable option for bread production. On the other hand, SDS gel electrophoresis carried out by Yu et al. (2020) showed an increase in soluble proteins in frozen dough, indicating ongoing protein degradation during frozen storage, however, in this study this tendency was not evidenced.

Tabla 1. Efecto del tiempo de pre-horneado, velocidad de congelación y tiempo de almacenamiento en congelación sobre la proteína soluble (glutenina de bajo peso molecular y gliadina) del pan pre-horneado.

Table 1. Effect of part-baking time, freezing rate and frozen storage time on soluble protein (LMW-glutenin and gliadin) of part-baked bread.

Frozen storage (days)	Freezing rate (°C/min)	Part-baking (min)	LMW-GLU (x10 ¹⁰)	GLI (x10 ¹⁰)
Fresh dough		0	1.84 ± 0.15 ^c	3.68 ± 0.01 ^d
		3	1.26 ± 0.06 ^f	3.42 ± 0.17 ^{fg}
		6	0.53 ± 0.07 ^k	3.24 ± 0.01 ^h
14	0.15	0	2.04 ± 0.04 ^b	3.76 ± 0.03 ^b
		3	1.75 ± 0.02 ^c	3.61 ± 0.03 ^e
		6	0.18 ± 0.01 ^m	3.22 ± 0.02 ^h
	1.45	0	1.34 ± 0.40 ^e	3.66 ± 0.11 ^d
		3	0.53 ± 0.13 ^k	3.58 ± 0.04 ^e
		6	0.32 ± 0.02 ^l	3.11 ± 0.02 ⁱ
28	0.15	0	2.07 ± 0.04 ^b	3.81 ± 0.07 ^a

42	1.45	3	1.11 ± 0.05^{fg}	3.62 ± 0.01^{de}
		6	0.33 ± 0.02^l	2.88 ± 0.31^j
		0	1.48 ± 0.12^d	2.94 ± 0.08^j
		3	1.11 ± 0.18^f	3.10 ± 0.02^i
		6	0.31 ± 0.02^l	2.51 ± 0.26^k
		0	1.77 ± 0.16^c	3.68 ± 0.01^d
	0.15	3	1.03 ± 0.03^h	3.49 ± 0.05^f
		6	0.63 ± 0.01^k	2.09 ± 0.03^m
		0	1.70 ± 0.10^c	3.59 ± 0.02^e
		3	0.91 ± 0.06^i	3.37 ± 0.01^g
		6	0.67 ± 0.01^j	2.00 ± 0.11^m
		0	1.65 ± 0.09^{cd}	3.46 ± 0.11^{fg}
56	1.45	3	1.55 ± 0.08^d	3.35 ± 0.17^{gh}
		6	0.50 ± 0.01^k	2.33 ± 0.16^{kl}
		0	1.47 ± 0.03^e	3.38 ± 0.05^g
		3	1.63 ± 0.01^d	3.71 ± 0.01^c
		6	0.96 ± 0.06^i	3.39 ± 0.29^{gh}

The values of LMW-GLU and GLI represent the area under the curve on the SEC-HPLC chromatograms. LMW-GLU: Low molecular weight glutenin; GLI: Gliadin.

Values with different letters in the same column are significative different ($P < 0.05$)

3.2 Insoluble protein quantification

The ANOVA results indicate a significant effect ($P < 0.01$) of part-baking time, followed by frozen storage time, on high molecular weight glutenin (HMW-GLU) concentration.

Fig. 1 illustrates the impact of part-baking time and frozen storage time on HMW-GLU content. In fresh dough, there is approximately 6 % of HMW-glutenin (insoluble protein), whereas at 3 and 6 min of part-baking, a slight increase in insoluble protein concentration (up to 1.5 %) was observed. This phenomenon may be explained by the partial unfolding of α -helix structures into β -sheet and random coils structures before exposure to elevated temperatures causing thermal denaturation and transforming soluble protein into insoluble complexes (Fan et al., 2024). During part-baking, the temperature enhances hydrophobic interactions and promotes the formation of insoluble protein complexes, a process further intensified by moisture loss. This trend persists across all frozen storage time. During protein extraction, previously soluble protein material may have become insoluble due to heat exposure, thereby increasing its measured concentration at 3 and 6 min of part-baking. Increased hydrophobic interactions may reduce the cross-linking of unfolded HMW-GLU proteins, thereby weakening the gluten network (Yang et al., 2025).

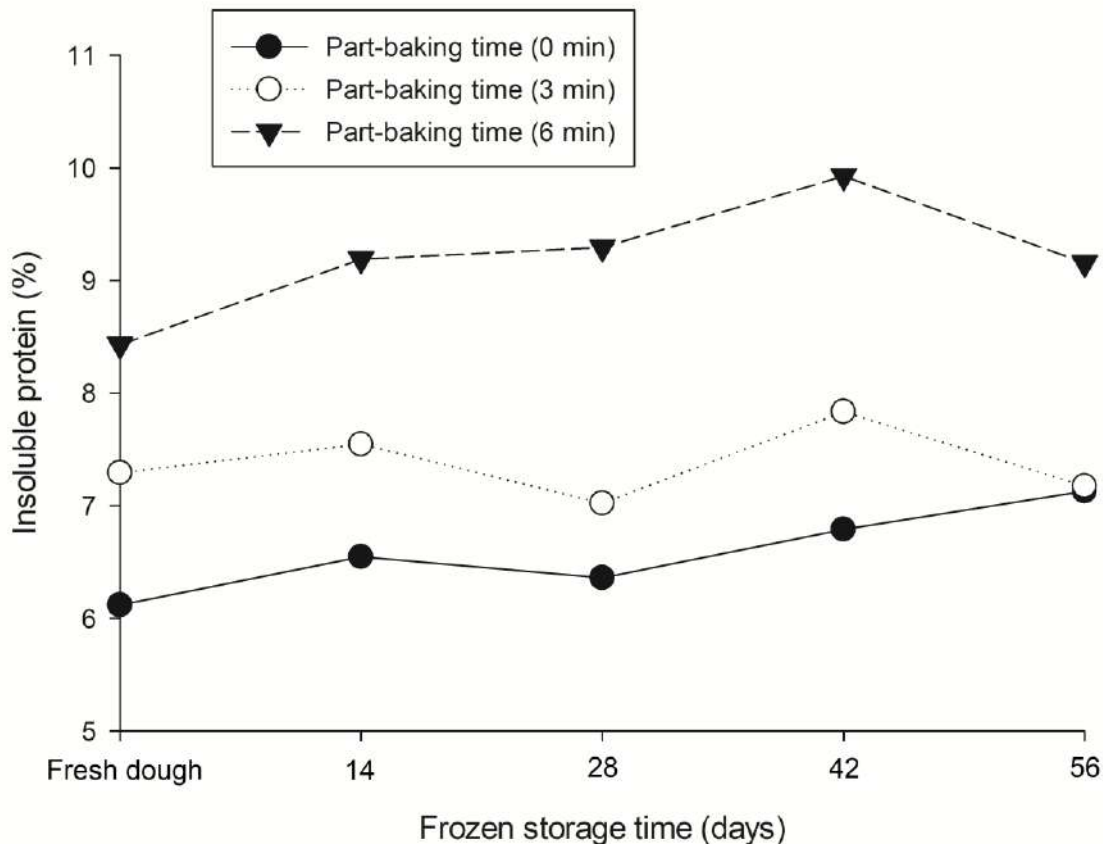


Figure 1. Effect of part-baking time and frozen storage time on the insoluble protein (HMW-GLU) of part-baked bread.

Figura 1. Efecto del tiempo de pre-horneado y el tiempo de almacenamiento en congelación sobre la proteína insoluble (HMW-GLU) del pan pre-horneado.

Conversely, when gluten proteins are exposed to high temperatures, a deamination process occurs, leading to peptide chain folding and structural deformation. Additionally, according to another studies, the gelatinization of starch granules further compacts the protein structure by reinforcing the folded conformation (Chen et al. 2021).

Fig. 2 depicts the effect of freezing rate and frozen storage time on insoluble proteins in part-baked bread. The freezing rate did not show a significant influence on HMW-GLU content ($P < 0.05$). Higher proportions of insoluble protein were observed at fresh dough and 28 days of frozen storage, whereas lower levels were found at 14, 42 and 56 days. Under slow freezing conditions, HMW-GLU levels remained constant throughout the frozen storage period. This observation contrasts with previous studies that reported reductions due to freezing and oxidation-reduction reactions (Zhang et al. 2024). In the present study, an increase in insoluble protein during frozen storage was observed only under fast freezing conditions, suggesting that fast freezing rate may be more effective in preserving glutenin functionality.

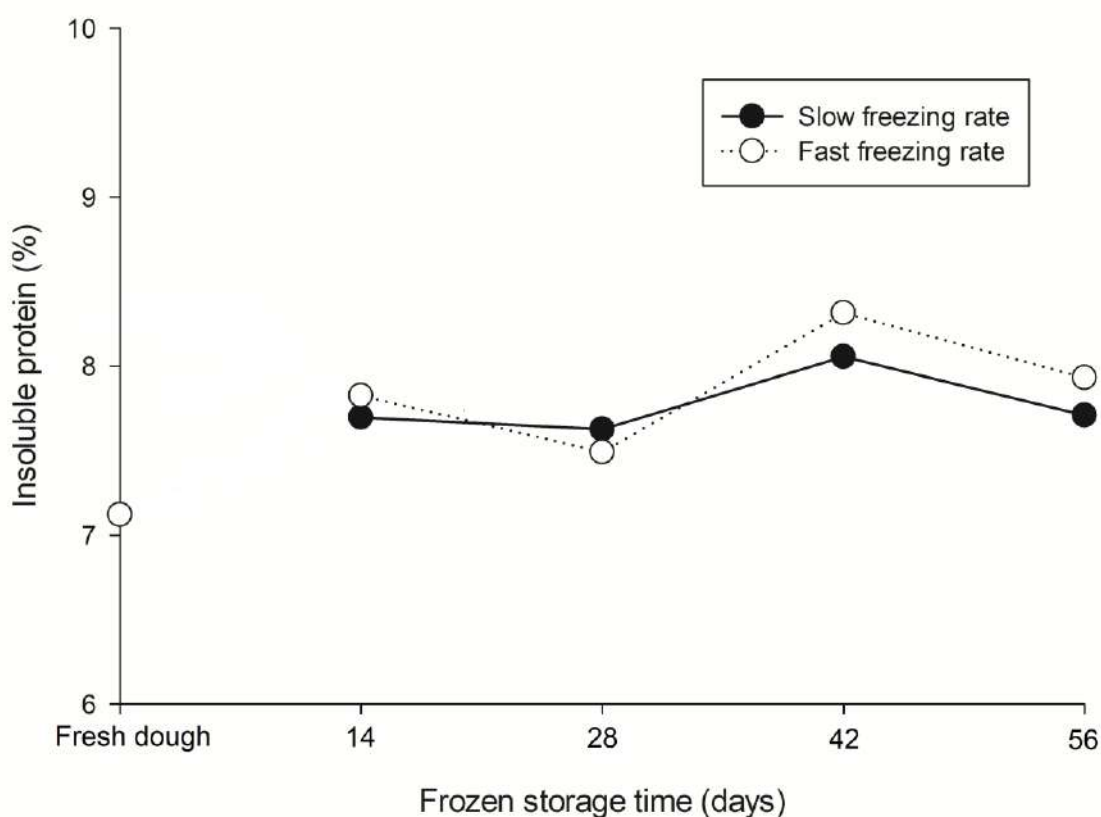


Figure 2. Effect of freezing rate and frozen storage time on the insoluble protein (HMW-GLU) of part-baked bread.

Figura 2. Efecto de la velocidad de congelación y el tiempo de almacenamiento en congelación sobre la proteína insoluble (HMW-GLU) del pan pre-horneado.

3.3 Free thiols content

The ANOVA results indicate a significant effect ($P < 0.01$) of freezing rate on protein free thiol content (SH), followed by part-baking time and frozen storage time.

Fig. 3 illustrates the influence of part-baking time and frozen storage time on the concentration of SH groups in part-baked bread proteins. Variations in free thiol content provide insight into the disruption or formation of disulfide bonds, which play a crucial role in gluten aggregation and structural integrity (Li et al., 2019). In fresh dough, the highest SH content is observed; however, a notable decrease of 4.2 % and 14.5 % was observed at 3 and 6 min, respectively, reaching its lowest value after 6 min of part-baking. Additionally, free thiol content tends to decline with increasing frozen storage time, with the highest levels recorded with fresh dough and the lowest at 42 and 56 days.

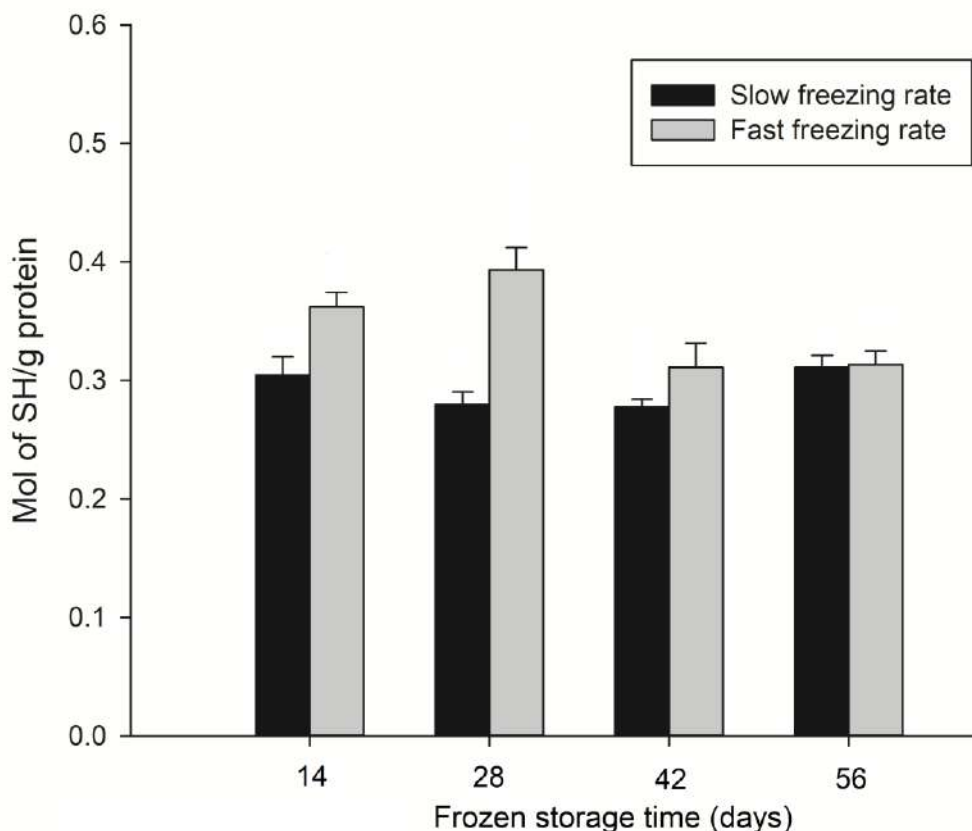


Figure 3. Effect of part-baking time and frozen storage time on the free thiols content of protein of part-baked bread.

Figura 3. Efecto del tiempo de pre-horneado y del tiempo de almacenamiento en congelación sobre el contenido de tioles libres de las proteínas del pan pre-horneado.

The stability of the gluten network depends on the number of disulfide bonds, even though free thiols represent only 2 % of the total amino acids in wheat proteins (Wieser et al., 2023). Studies indicate that exposure to high temperatures during baking promotes proteins denaturation, causing them to aggregate into hydrophobic complexes, reducing functionality and impairing the ability to revert to their original state. Moreover, heat-induced pH changes also lead to protein fragmentation, precipitation, and polymer breakdown. During this process, glutathione molecules present in flour and yeast are oxidized to glutathione disulfide, a reaction reported to have minimal impact on dough rheology (Hong et al., 2023). During frozen storage, ice crystal formation damages proteins and disrupts disulfide bonds, resulting in an increase in the number of free thiol groups per gram of protein (Shu et al., 2022). However, as frozen storage time progresses, water redistribution due to freezing promotes hydrophobic interactions between proteins, leading to the formation of insoluble complexes, which make free thiol groups unavailable for bond formation.

Fig. 4 shows the effect of freezing rate and frozen storage time on free thiol content in part-baked bread proteins. Higher levels of free thiols were observed at 14, and 28 days of frozen storage using fast freezing rate. The opposite effect was observed at 42 days, and no difference was detected at 56 days. Taylor et al. (2016) reported that most reductions in free thiol content facilitated by glutathione occur within the first few minutes of kneading.

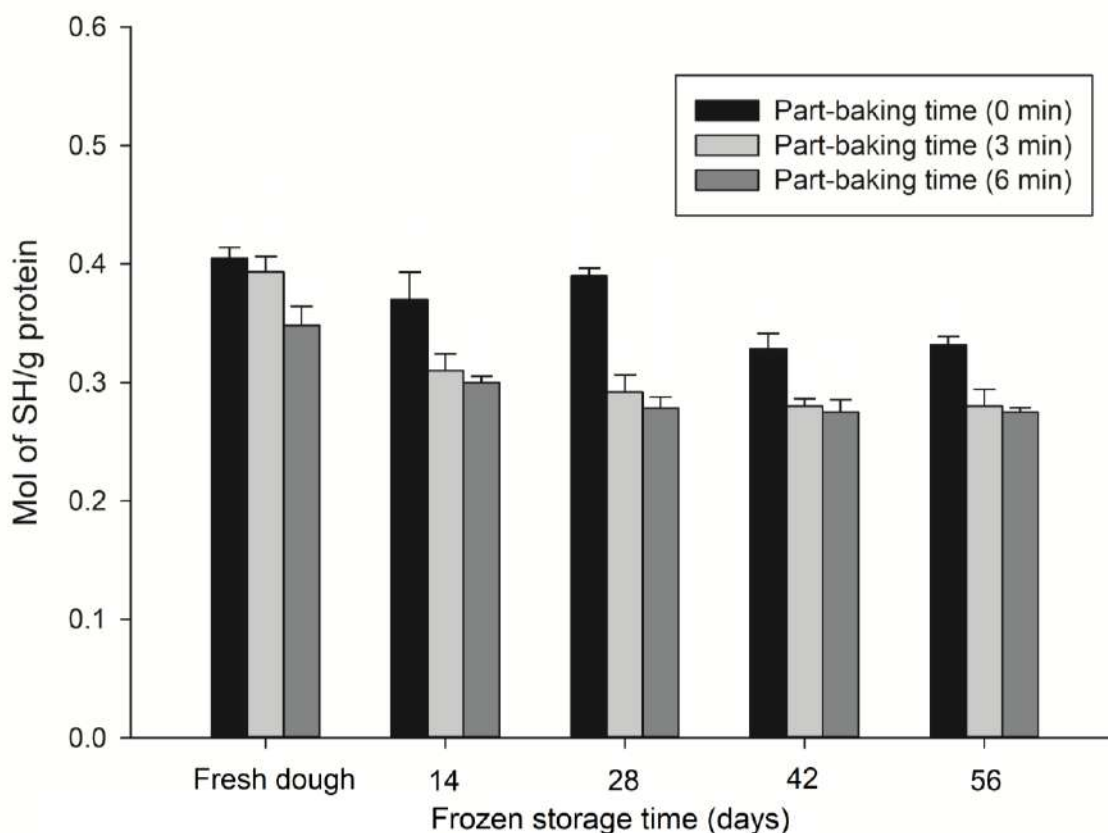


Figure 4. Effect of part-baking time and freezing rate on the free thiols content of proteins of part-baked bread.
Figura 4. Efecto del tiempo de pre-horneado y la velocidad de congelación sobre el contenido de tioles libres de las proteínas del pan pre-horneado

As explained in Fig. 3, part-baking reduces free thiol content due to protein denaturation, making SH groups unavailable for bond formation. Previous studies suggest that fast freezing leads to less disulfide bond breakdown, resulting in fewer SH groups. However, the present findings show higher free thiol content under fast freezing at short frozen storage. This effect may be attributed to ice crystal formation during the nucleation stage, which limits water redistribution and reduces protein denaturation. Although Baratto et al. (2016) found that wheat flour supplemented with ascorbic acid improved dough plasticization by increasing dry yeast concentration, further research is needed to fully understand the impact of freezing conditions on the SH groups availability.

4. Conclusions

This study demonstrated that part-baking time, freezing rate, and frozen storage time significantly influence the solubility and structural stability of gluten proteins in part-baked bread. At all frozen storage times, the percentage of LMW-glutenin and gliadin was highest with fresh dough but decreased at 3 and 6 min of part-baking. Conversely, insoluble protein concentration increased at 3 and 6 min of part-baking, likely due to heat-induced protein insolubility. The freezing rate played a key role in protein preservation. Fast freezing better preserves soluble protein levels and free thiol groups, particularly at early frozen storage. Conversely, slow freezing was more effective in preserving glutenin stability over extended frozen storage. Free thiol content decreased with longer frozen storage, likely due to structural damage caused by ice crystal formation and subsequent hydrophobic interactions. Part-baking time also contributed to this decline, as protein denaturation made sulfhydryl (SH) groups unavailable for bond formation. Overall, short part-baking times combined with fast-freezing is recommended to better preserve protein functionality in part-baked bread, providing valuable insight for improving the quality and shelf-life of frozen bakery products.

Acknowledgment

Thanks to DIPA for lending its laboratories and supporting this research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

5. References

- Armenta-Aispuro, P. G., Rouzaud-Sáñez, O., López-Franco, Y. L., Lizardi-Mendoza, J., Cárdenas-López, J. L., & Rosell, C. M. (2024). Freezing of baked goods and prepared foods. In S. M. Jafari and H. Rostamabadi (Eds.). *Low-Temperature Processing of Food Products*. pp. 259-288. Woodhead Publishing, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818733-3.00003-5>
- American Association of Cereal Chemists. (2000). *Approved Methods of the AACCC*, 10th ed. (Vol. 1 y 2). Minnesota, USA, 2000. <https://www.cerealsgrains.org/>

- Baratto, C. M., Becker, N. B., Gelinski, J. M. L. N., & Silveira, S. M. (2016). Influence of enzymes and ascorbic acid on dough rheology and wheat bread quality. *African Journal of Biotechnology*, 15(3), 55-61. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14931>
- Bai, N., Guo, X., Xing, J., & Zhu, K. (2022). Effect of freeze-thaw cycles on the physicochemical properties and frying performance of frozen Youtiao dough. *Food Chemistry*, 386, 132854. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132854>
- Carboni, A. D., Gómez-Zavaglia, A., Puppo, M.C., & Salinas, M.V. (2022). Effect of freezing wheat dough enriched with calcium salts with/without inulin on bread quality. *Foods*, 11 (13), 1866. <https://doi.org/10.3390/foods11131866>
- Castillo-Arias, A., Fuenmayor Bobadilla, C. A., & Zuluaga Domínguez, C. M. (2024). Cryoprotectants for Frozen Dough: A Review. *Food Biophysics*, 19, 18–28. <https://doi.org/10.1007/s11483-023-09791-w>
- Chen, X., Fu, W., Luo, Y., Cui, C., Suppavorasatit, I., & Liang, L. (2021). Protein deamidation to produce processable ingredients and engineered colloids for emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3788–3817. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12759>
- Datamintelligence. (2025). Par-baked bread market size, share análisis, growth trends and forecast report 2025-2032, 180 pp. <https://www.datamintelligence.com/research-report/par-baked-bread-market>
- Ding, C., Cai, W. H., Sun, J. Y., Tao, H., & Wang, H. L. (2024). Unveiling the binding mechanism between starch granule-surface proteins and glutenins during dough mixing process. *Food Hydrocolloids*, 150, 109760. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109760>
- Fan, L., Wang, H., Li, M., Lei, M., Li, L., Ma, S., & Huang, J. (2024). Impact of wheat bran dietary fiber on gluten aggregation behavior in dough during noodle processing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, Part 2, 128765. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128765>
- Gaikwad, S., & Arya, S. S. (2018). Influence of frozen storage on quality of multigrain dough, par baked and ready to eat thalipeeth with additives. *LWT*, 96, 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.057>
- Gerardo-Rodriguez, J. E., Ramírez-Wong B., Torres-Chávez, P. I. Ledesma-Osuna, A. I., Carvajal-Millán, E., López-Cervantes, J., & Silvas-García, M. I. (2021)- Effect of part-baking time, freezing rate and storage time on part-baked bread quality. *Food Science and Technology*, 41, 21. <https://doi.org/10.1590/fst.06820>
- Halagarda, M. (2017). Effects of trehalose and dough additives incorporating enzymes on physical characteristics and sensory properties of frozen savory Danish dough. *LWT*, 86, 623-610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.048>
- Hong, T., Huo, X., Yang, T., Jin, Y., Xu, D., Wu, F., & Xu, X. (2023). Insights into zein on rheological, structural, thermal properties of wheat dough under glutathione and azodicarbonamide, salt, or acidic conditions. *Food Bioscience*, 56, 103329. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103329>

- Jiang, J., Yang, J., Fan, X., Zhang, Y., Li, M., Zhang, B., Guo, B., & Zhong, G. (2025). Regulation of ice crystal growth in frozen dough: From the effect of gluten and starch fractions interaction on water binding - A review. *Food Chemistry*, 476, 143509. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143509>
- Li, B., Cao, Z., Zhang, W., Wei, S., Lv, Y., & Hu, Y. (2023). Protein oxidation-induced changes in the aggregation behavior and structure of gluten. *LWT*, 184, 115062. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115062>
- Li, H., Wang, J., Pan, L., & Lu, Q. (2019). Effect of amino and thiol groups of wheat gluten on the quality characteristics of Chinese noodles. *Journal of Food Science and Technology*, 56 (6), 2825-2835. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03688-8>
- Lookhart, G. L., Bean, S. R., & Bietz, J. A. (2003). HPLC of gluten monomeric proteins. In P.R. Shewry and G.L. Lookhart (Eds.) *Wheat Gluten Protein Analysis* pp. 64–65, AACC. International, St. Paul, MN
- Mahato, S., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2019). Glass transitions as affected by food compositions and by conventional and novel freezing technologies: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 94, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.TIFS.2019.09.010>
- Marti, A., Marengo, M., Bonomi, F., Casiraghi, M. C., Franzetti, L., Pagani, M. A., & Iametti, S. (2017). Molecular features of fermented teff flour relate to its suitability for the production of enriched gluten-free bread. *LWT - Food Science and Technology*, 78, 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.042>
- Osborne, T. B. (1907). *Proteins of the wheat kernel*. Washington: Carnegie Institution of Washington, 108–116. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.26152>
- Rani, M., Siddiqi, R. A., Sharma, R., Gill, B. S., & Sogi, D. S. (2023). Functional and structural properties of gliadin as influenced by pH, extraction protocols, and wheat cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123484. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123484>
- Roos, Y. H. (2021). Glass transition and re-crystallization phenomena of frozen materials and their effect on frozen food quality. *Foods*, 10 (2), 447. <https://doi.org/10.3390/foods10020447>
- Shu, Q., Wei, T., Liu, X., Liu, S., & Chen, Q. (2022). The dough-strengthening and spore-sterilizing effects of mannosylerythritol lipid-A in frozen dough and its application in bread making. *Food Chemistry*, 369, 131011. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131011>
- Souza-Guimarães, D. J., Audino Zambelli, R., Amorim Afonso, M. R., & Ferreira Pontes, D. (2025). Cryoprotective potential of vegetable powders and polydextrose in frozen bread doughs. *International Journal of Refrigeration*, 172, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.01.010>
- Su, T., Zhang, Y., Du, W., Zeng, J., & Gao, H. (2024). Effect of modified trehalose on regulation of gluten protein structure and steamed bread quality. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283(4), 137969. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137969>
- Taylor, J. R. N., Taylor, J., Campanella, O. H., & Hamaker, B. R. (2016). Functionality of the storage proteins in gluten-free cereals and pseudocereals in dough systems. *Journal of Cereal Science*, 67, 22-34. <http://hdl.handle.net/2263/52232>

- Wei, Q., Zhang, G., & Xie, J. (2025). Modulatory effects of carboxymethyl chitosan on the textural and quality attributes of frozen rice dough and corresponding rice bread. *Food Hydrocolloids*, 162, 111021. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.111021>
- Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2023). Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. *Cereal Chemistry*, 100(1), 23–35. <https://doi.org/10.1002/cche.10572>
- Yang, T., Wang, P., Zhou, Q., Jiang, D., & Jiang, H. (2025). Effect of high-molecular-weight glutenin subunit deletion on gluten functionality and Chinese southern-type steamed bread quality. *Food Chemistry*, 464, 141664. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141664>
- Yu, W., Xu, D., Zhang, H., Guo, L., Hong, T., Zhang, W., Jin, Y., & Xu, X. (2020). Effect of pigskin gelatin on baking, structural and thermal properties of frozen dough: Comprehensive studies on alteration of gluten network. *Food Hydrocolloids*, 102, 105591. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105591>
- Zhang, H., Fan, H., Xu, X., & Xu, D. (2024). Deterioration mechanisms and quality improvement methods in frozen dough: An updated review. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104251>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Disruptores endocrinos: impacto en ejes hormonales y estrategias nutricionales. Revisión narrativa

Endocrine Disruptors: Impact on Hormonal Axes and Nutritional Strategies. A Narrative Review

Diana Cecilia Grajeda-Portillo¹, Ana Karen García-Quezada¹, Rocío Ruiz-Leyva¹, Adriana Castillo-Estrada¹, Blanca Elena Hernández-Tarín¹, Gloria Alejandra Fernández-Rodríguez¹, Mariana García-Aguilar¹, Blanca G. Beltrán^{1*}

¹ Facultad de Enfermería y Nutriología, Universidad autónoma de Chihuahua. Campus Universitario II. Circuito Universitario, Cd. Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125.

*Correspondencia: bbeltran@uach.mx (Blanca Gladiana Beltrán Piña)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1796>

Recibido: 18 de diciembre de 2024; Aceptado: 16 de julio de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Julián Esparza-Romero

Resumen

Los disruptores endocrinos (EDCs, *por sus siglas en inglés*) son contaminantes ambientales capaces de alterar los complejos sistemas hormonales desde el desarrollo fetal. Esta revisión narrativa sintetiza los mecanismos de acción de los EDCs en los principales ejes hormonales y analiza intervenciones nutricionales como estrategias preventivas. Mediante una búsqueda exhaustiva en *PubMed*, *Scopus*, *Web of Science* y *SciELO*, se identificó que la exposición a EDCs ocurre principalmente por alimentos contaminados, ya sea de forma natural o por migración desde envases. Los ftalatos, bisfenol A, PCBs, aditivos alimentarios y metales pesados interfieren con proteínas transportadoras y receptores hormonales, provocando trastornos del desarrollo, metabólicos y reproductivos. La evidencia sugiere que una dieta equilibrada puede contrarrestar estos efectos adversos mediante tres mecanismos: reducción de la ingesta de EDCs, prevención de su acumulación en el organismo, y suministro de nutrientes esenciales y compuestos bioactivos (vitamina C, E, betacaroteno, flavonoides, coenzima Q-10, ácidos grasos omega-3 y polifenoles) que mitigan el estrés oxidativo y la inflamación inducidos por EDCs. Se propone integrar la evaluación de exposición a EDCs en la práctica clínica con el fin de mejorar el diagnóstico temprano y el tratamiento de enfermedades no transmisibles.

Palabras clave: exposiciones-ambientales, disruptor-endocrino, ejes-hormonales, riesgos-a-la salud, nutrición.

Abstract

Endocrine-disrupting chemicals (EDCs) are environmental contaminants that interfere with hormonal systems from the time of fetal development onward. This narrative review summarizes the mechanisms of action of EDC across key hormonal axes and explores nutritional interventions as preventive strategies. A comprehensive literature search in PubMed, Scopus, Web of Science, and SciELO revealed that EDC exposure primarily occurs through contaminated food, either naturally or due to migration from packaging. Phthalates, bisphenol A, PCBs, food additives, and heavy metals interfere with hormone transport proteins and receptors, contributing to the development of developmental, metabolic, and reproductive disorders. Evidence suggests that a balanced diet may mitigate these adverse effects through three pathways: reducing EDC intake, limiting their accumulation in the body, and supplying essential nutrients and bioactive compounds, such as vitamin C, vitamin E, β -carotene, flavonoids, coenzyme Q-10, omega-3 fatty acids, and polyphenols, that combat oxidative stress and inflammation induced by EDCs. Incorporating EDC exposure assessment into clinical practice may improve early diagnostic and management of non-communicable diseases.

Keywords: environmental-exposures, endocrine-disruptor, hormonal-axes, health-risks, nutrition.

1. Introducción

El sistema endocrino regula funciones corporales esenciales mediante ejes hormonales que preservan la homeostasis a través de la liberación de hormonas y neurotransmisores, los cuales estimulan a otros órganos y glándulas. Su papel crucial se encuentra en la regulación de procesos fisiológicos fundamentales (metabolismo, reproducción, desarrollo, respuesta al estrés, homeostasis) (Guarnotta et al., 2022), especialmente en periodos específicos como la adolescencia, el embarazo y la menopausia, así como en individuos que padecen ciertas patologías, en los que las personas pueden ser más vulnerables a los efectos de desórdenes hormonales (WHO, 2012).

Los disruptores endocrinos (EDCs, *por sus siglas en inglés*) son compuestos químicos exógenos, de origen natural o sintético, presentes en el ambiente, que interfieren con funciones del sistema endocrino al unirse a receptores hormonales y actuar como agonistas o antagonistas (Guarnotta et al., 2022). La problemática asociada a los EDCs fue reconocida por primera vez por la comunidad científica en la Conferencia de *Wingspread* en 1991, donde se identificaron como una amenaza para la salud de fauna silvestre y seres humanos. Posteriormente, en 2002, la Organización Mundial de la Salud los definió formalmente, destacando su capacidad para inducir efectos adversos en la salud de un organismo, su descendencia o poblaciones (Demeneix y Slama, 2019). El impacto de los EDCs varía según el compuesto, sitio de acción y eje afectado. En modelos animales y humanos, se ha observado que provocan alteraciones en la producción hormonal, la expresión genética, absorción de nutrientes clave, inhibición de la secreción hormonal e interferencias en el transporte y metabolismo hormonal, emulación de funciones biológicas de hormonas, alteración en la señalización hormonal, competencia con receptores y cambios en la cantidad de estos (Guarnotta et al., 2022). Además, los EDCs pueden inducir la producción de especies reactivas de oxígeno, alterar la expresión y actividad de antioxidantes, así como afectar estructuras celulares y enzimáticas (McGaha, 2024). La exposición humana a EDCs es continua y ocurre a través de vías como la ingestión, inhalación y absorción

dérmica, debido a su presencia en productos de uso cotidiano, como productos de higiene personal, cosméticos, farmacéuticos, productos de limpieza y alimentos (Li y Robaire, 2025). En los alimentos, se han identificado ftalatos, bisfenol A, bifenilos policlorados y polibromados, aditivos alimentarios, edulcorantes, metales pesados y sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, entre otros (Mora-Vargas y Loera-Serna, 2024). Estos pueden alterar el equilibrio hormonal al interferir en la síntesis, transporte y metabolismo de hormonas, acumulándose en los tejidos o interactuando con otros compuestos (Assenza et al., 2025).

Se estima que aproximadamente el 25 % de las enfermedades en el mundo son atribuibles a factores ambientales, entre ellos los EDCs, implicados en trastornos reproductivos (infertilidad, malformaciones, pubertad precoz, entre otros), cáncer (ovarios, mama, testículos, tiroides), enfermedades neurológicas (trastornos del espectro autista, Parkinson, Alzheimer) y metabólicas (síndrome metabólico, obesidad, diabetes y enfermedades cardiovasculares) (Azaretzky et al., 2018; Briceño-Rodríguez et al., 2024). Los grupos más vulnerables a los efectos de la exposición a los EDCs incluyen niños, mujeres embarazadas, adultos mayores, personas enfermas y trabajadores expuestos ocupacionalmente (De-Paula y Alves, 2024).

La nutrición es considerada una estrategia prometedora para mitigar los efectos adversos de los EDCs a través de componentes bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, como fitoquímicos, polifenoles (resveratrol y galato de epigallocatequina), ácidos grasos omega-3, coenzima Q10 y fibra dietética, que pueden contribuir a reducir el estrés oxidativo inducido por los EDCs, protegiendo así el equilibrio hormonal (Hoffman y Hennig, 2017). Asimismo, modificaciones en el estilo de vida, un estado nutricional adecuado y cambios en la manipulación de alimentos pueden disminuir la exposición a EDCs y su impacto en el organismo (Azaretzky et al., 2018).

El objetivo de esta revisión fue sintetizar la evidencia científica disponible sobre los mecanismos de acción de disruptores endocrinos en los principales ejes hormonales y el papel de intervenciones nutricionales como estrategias preventivas y mitigadoras del desequilibrio hormonal inducido por la exposición ambiental a estos compuestos. El análisis se basa en estudios realizados en modelos animales, cultivos celulares, tejidos y en humanos, bajo condiciones tanto *in vivo* como *in vitro*. Asimismo, se aborda la clasificación de los EDCs, sus principales vías de exposición y su interacción con factores nutricionales, considerando a la nutrición como un modulador clave en la mitigación de los efectos adversos inducidos por estos compuestos.

2. Metodología de búsqueda

2.1. Estrategia de búsqueda

Para esta revisión narrativa sobre disruptores endocrinos, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica exhaustiva realizada entre agosto y diciembre de 2024. Se consultaron las bases de datos electrónicas *PubMed/MEDLINE*, *Scopus*, *Web of Science* y *SciELO*. La estrategia de búsqueda se diseñó utilizando términos MeSH (*Medical Subject Headings*, por sus siglas en inglés) y palabras clave relacionadas con ejes hormonales y mecanismos de acción de EDCs. Las ecuaciones de búsqueda empleadas incluyeron combinaciones de los siguientes términos: "*Endocrine disruptors*" OR "*Endocrine disrupting chemicals*" OR "*EDCs*"; "*Thyroid axis*" AND "*Lactotropic axis*" AND "*Corticotropic axis*" AND "*Thyrotropic axis*" AND "*Hypothalamic-Neurohypophysis Axis*" AND "*Nervous System and*

Gastrointestinal Tract Axis"; "Exposure routes" OR "Exposure pathways"; "Vulnerable populations" OR "Susceptible groups"; "Nutritional strategies" OR "Diet intervention" OR "Dietary compounds"; "Food contamination" OR "Food packaging". Estos términos fueron combinados estratégicamente para refinar los resultados de acuerdo con los distintos aspectos abordados en la revisión.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos publicados con énfasis en literatura de los últimos 10 años, en inglés o español, y estudios originales realizados en modelos animales, cultivos celulares, tejidos y humanos, bajo condiciones tanto *in vivo* como *in vitro* relevantes, así como documentos científicos que abordaron mecanismos de acción de EDCs en los ejes hormonales de interés. También se consideraron revisiones y libros que incluyeran intervenciones nutricionales enfocadas en mitigar los efectos de estos compuestos. Se excluyeron reportes de casos aislados, cartas al editor y resúmenes de congresos.

2.3. Proceso de selección

La selección de artículos se realizó en tres etapas: i) revisión inicial de títulos y resúmenes para identificar publicaciones potencialmente relevantes, ii) lectura completa de artículos preseleccionados para confirmar su pertinencia temática y metodológica, iii) análisis de información en función de los objetivos de la revisión.

2.4. Análisis y síntesis de la información

Dado el amplio alcance del tema, esta revisión narrativa priorizó aquellos aspectos con mayor relevancia clínica y nutricional. La información se estructuró en las siguientes secciones temáticas: 1) sistema endocrino, 2) definición, clasificación y exposición alimentaria a los EDCs, 3) mecanismos de acción de los EDCs desde un enfoque molecular, 4) ejes hormonales afectados, 5) disruptores endocrinos y grupos vulnerables, y 6) papel de la nutrición en la mitigación de los efectos de las exposiciones ambientales sobre el equilibrio hormonal. Esta estructura permitió identificar patrones, tendencias y relaciones entre diferentes estudios con diversas metodologías y enfoques de investigación.

3. Desarrollo del tema

3.1. Sistema Endocrino

El sistema endocrino está compuesto por diversos ejes hormonales, cada uno formado por glándulas que secretan hormonas en el torrente sanguíneo. Estas hormonas actúan como mensajeros químicos que regulan las funciones fisiológicas en todo el cuerpo (Heshmati, 2020). Los principales ejes hormonales incluyen al lactotrofo, tirotrofo, corticotrofo, gonadotrófico, somatotrófico y el eje hipotálamo-neurohipófisis (Plunk y Richards, 2020).

El centro regulador del sistema es el hipotálamo, el cual está conectado a la hipófisis a través del infundíbulo, por esta conexión, el hipotálamo emite señales neurohormonales que la hipófisis procesa y transmite a otras glándulas endocrinas, formando así el eje hipotálamo-hipofisario-glándula (Campbell y Jialal, 2022). Las hormonas liberadas por el hipotálamo incluyen la hormona liberadora de corticotropina (CRH), la hormona liberadora de tirotropina (TRH), la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH), la hormona liberadora de la hormona del crecimiento (GHRH), la somatostatina, la hormona liberadora de prolactina y la oxitocina (OT) (Campbell y Jialal, 2022). Estas hormonas estimulan a la adenohipófisis para que libere hormonas que, a su vez, actúan sobre las glándulas periféricas, induciendo la producción de sus propias hormonas, cuando las glándulas periféricas han producido suficiente cantidad de estas hormonas, el hipotálamo detecta este aumento y reduce su producción, un proceso que se conoce como retroalimentación negativa (Fig. 1) (Campbell y Jialal, 2022).

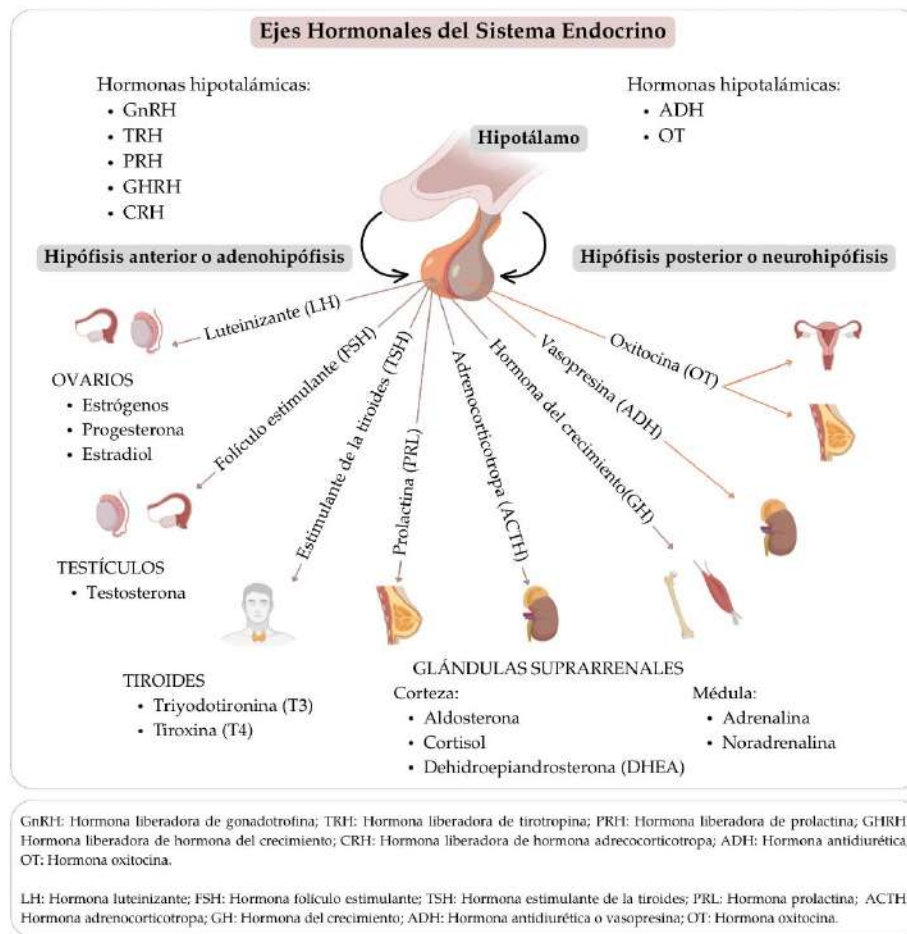


Figura 1. Ejes hormonales, glándulas y hormonas. Fuente: imagen elaborada por R.R.L., basada en datos de Plunk y Richards (2020).

Figure 1. Hormonal Axes, Glands, and Hormones Source: Image created by R. R. L., based on data from Plunk and Richards (2020).

La hipófisis se divide en dos lóbulos: la adenohipófisis (anterior) y la neurohipófisis (posterior), la adenohipófisis contiene células especializadas incluidas las somatotropas, lactotropas, corticotropas, tiotropas y gonadotropas, que secretan hormona del crecimiento (GH), prolactina (PRL), la hormona adrenocorticotrópica (ACTH), la hormona estimulante de la tiroides (TSH), la hormona folículo estimulante (FSH) y la hormona luteinizante (LH), respectivamente (Campbell y Jialal, 2022). Por otro lado, en la neurohipófisis, se liberan directamente al torrente sanguíneo la oxitocina y la hormona antidiurética (ADH) (Campbell y Jialal, 2022).

Además de glándulas endocrinas clásicas, existen tejidos no glandulares con funciones secretoras de compuestos químicos que actúan como hormonas, como el sistema nervioso central (SNC)-sistema digestivo (para aumento o disminución de apetito), así como el eje SNC-intestinos-microbiota, entre otros, que involucran al tejido adiposo, pulmones y corazón (Rhee y Pearce, 2011; Esteve-Ràfols, 2014; Tell y Lysenkov, 2014).

Las hormonas ejercen su acción mediante mecanismos genómicos y no genómicos, en el primero, las hormonas lipófilas, como las hormonas esteroides y tiroideas, se unen directamente a sus receptores, lo que provoca una alteración en la expresión genética (Plunk y Richards, 2020). En contraste, en el mecanismo no genómico, la expresión génica se modifica a través de vías de transducción de señales intracelulares cuando las hormonas hidrófilas (como los péptidos o catecolaminas) se unen a receptores en la membrana celular (Plunk y Richards, 2020). Estos mecanismos pueden ser alterados por la presencia de contaminantes ambientales con capacidad como disruptores endocrinos (EDCs), que interfieren con la señalización hormonal normal.

3.2. Definición, clasificación y exposición alimentaria a EDCs

Los contaminantes son sustancias químicas generadas por las actividades humanas, que terminan en el medio ambiente y, posteriormente, se incorporan a los organismos, incluidos los humanos, a través de diversas vías de exposición (Kumar et al., 2020). Los EDCs son compuestos químicos capaces de imitar, bloquear o interferir con las hormonas del sistema endocrino asociados con una amplia gama de problemas de salud (NIH, 2024).

Se estima que existen aproximadamente 85,000 sustancias químicas fabricadas por el ser humano en el mundo, de las cuales alrededor de 1,000 podrían ser disruptores endocrinos debido a sus propiedades químicas (NIH, 2024). Los EDCs se pueden clasificar según su naturaleza química o su origen; entre los naturales se encuentran los fitoestrógenos presentes en plantas, los cuales pueden imitar a los estrógenos, pero no se acumulan en el tejido adiposo y los EDCs sintéticos, que pueden acumularse en el tejido adiposo y persistir en el medio ambiente, lo que provoca una exposición prolongada (Assenza et al., 2025; Demir et al., 2025). Ejemplos de estos compuestos incluyen plásticos con bisfenoles (BPA), plastificantes (ftalatos), bifenilos policlorados (PCBs), bifenilos polibromados (PBB), dioxinas, plaguicidas organoclorados (metoxicloro, clorpirifos, diclorodifeniltricloroetano y su metabolito diclorodifenildicloroetileno), otros pesticidas, contaminantes orgánicos persistentes como el hexaclorobenceno (HCB), y metales pesados (como As, Pb, Cd, Al, Sn, y Hg) (Kumar et al., 2020; Asenuga y Olagunju, 2023). Algunos aditivos alimentarios utilizados para mejorar la textura, el color y la conservación también han sido identificados como EDCs (Peivasteh-Roudsari et al., 2023; De-Paula y Alves, 2024; McGaha, 2024).

La exposición a los EDCs es principalmente involuntaria y puede comenzar incluso durante la etapa intrauterina, o incluso antes de la concepción, ya que estos compuestos pueden permanecer intactos en el medio ambiente durante largos periodos de tiempo, lo que facilita su distribución geográfica (Briceño-Rodríguez et al., 2024). Durante el embarazo, los EDCs pueden atravesar la barrera placentaria y ser transmitidos de la madre al feto, así como transferirse a través de la leche materna durante la lactancia (Heshmati, 2020). Las principales vías de exposición incluyen el aire, agua, alimentos, la piel, sangre, leche materna y placenta. En la población general no expuesta ocupacionalmente, la principal fuente de exposición es la ingesta de alimentos contaminados, debido a que estos compuestos químicos se acumulan a lo largo de la cadena alimentaria; sin embargo, en trabajadores con exposición ocupacional, las actividades laborales constituyen la fuente primaria de contacto con estos compuestos (Heshmati, 2020; Briceño-Rodríguez et al., 2024).

Los alimentos pueden contener EDCs de forma natural o como resultado de la contaminación en diversas etapas de su cadena de producción, estos compuestos también pueden transferirse desde envases y empaques que están en contacto con los alimentos (Fig. 2) (De-Paula y Alves, 2024; McGaha, 2024). La exposición también puede aumentar por el uso de aditivos en productos ultraprocesados, así como de contaminantes que se incorporan durante la manipulación, limpieza, preparación, cocción y almacenamiento.



Figura 2. Contaminación de alimentos por EDCs. Fuente: imagen elaborada por B.G.B.P., con datos obtenidos de De-Paula y Alves (2024).

Figure 2. Food Contamination by EDCs Source: Image created by B.G.B.P. with data obtained from De Paula and Alves (2024).

Los EDCs pueden contaminar los alimentos a través de dos mecanismos principales. Por un lado, los EDCs pueden migrar desde los envases hacia los alimentos dependiendo del tipo de material del empaque y la composición fisicoquímica del alimento. Los envases más pequeños presentan una mayor tasa de migración de sustancias químicas debido a la mayor relación superficie-volumen,

proceso que se intensifica por cambios de temperatura o contacto prolongado. Esto provoca que sustancias conocidas como plastificantes (bisfenoles y ftalatos) que no han sido adheridos firmemente a los polímeros se desprendan, migrando al alimento. Este proceso se intensifica particularmente durante el calentamiento de alimentos (Puche-Juárez et al., 2023; Stevens et al., 2024). Por otro lado, los alimentos pueden contener residuos de agroquímicos con capacidad disruptora endocrina, los cuales se dispersan en el aire durante su aplicación y contaminan los cultivos directamente (De-Paula y Alves, 2024).

Los ftalatos, obtenidos por reacción del anhídrido ftálico con diversos alcoholes, constituyen una amplia clase de ésteres de ácido ftálico (PAEs), utilizados en industrias (Ahn y Jeung, 2023; Puche-Juárez et al., 2023; De-Paula y Alves, 2024). Durante la producción y el transporte de alimentos, los ftalatos pueden migrar desde tuberías de PVC, tintas, adhesivos y plásticos utilizados en empaques (Derakhshan et al., 2021). Las bebidas alcohólicas, debido a su contenido de etanol, son particularmente susceptibles a la contaminación por PAEs, debido a que el etanol actúa como disolvente, promoviendo su migración (Peivasteh-Roudsari et al., 2023). Asimismo, el agua embotellada puede contaminarse por PAEs por factores como el material de la botella, el tiempo de almacenamiento, el pH y la temperatura (30-60 °C), así como la exposición solar (Peivasteh-Roudsari et al., 2023).

El BPA es ampliamente utilizado en la fabricación de envases de alimentos, especialmente en recubrimientos internos de latas y utensilios de cocina (De-Paula y Alves, 2024). Este compuesto puede liberarse al ambiente, particularmente en ecosistemas acuáticos, donde afecta a organismos y especies terrestres a través de interacciones tróficas (Pombo-Arias et al., 2020; Ahn y Jeung, 2023).

Los PCBs son un grupo de productos químicos industriales que comprenden un par de anillos de fenilo, y uno o más cloros que se introducen en los anillos mediante un enlace simple (Arias et al., 2020). Los PCBs suelen ser químicamente inactivos, con excelentes propiedades fisicoquímicas como conductividad térmica y aislamiento eléctrico, lo que permite su uso en fluidos dieléctricos en transformadores y condensadores, fluidos hidráulicos, fluidos de transferencia de calor y aditivos en diversos usos, tanto cerrados como abiertos. Actualmente, la exposición humana a los PCBs se origina principalmente a través de la ingestión de alimentos (Pombo-Arias et al., 2020). Los PCBs contaminan el ganado, aves, peces y productos agrícolas a través de la cadena alimentaria, siendo el consumo de pescado, carne, grasas y productos lácteos las principales vías de exposición (Pombo-Arias et al., 2020).

Por su parte, los PBBs, compuestos similares a los PCBs, que consisten en una estructura central de bifenilo a la que se unen de 1 a 10 átomos de bromo, se utilizaron como retardantes de llama, es decir, para suprimir o evitar la combustión, hasta que fueron prohibidos en los años 70 en EE. UU., debido a su capacidad para migrar a cuerpos de agua y contaminar peces (Neblett et al., 2020).

Los alimentos procesados contienen aditivos que pueden interferir con el sistema endocrino, estos compuestos se adicionan a los alimentos procesados para realzar el sabor, mejorar la textura, prolongar la vida útil y añadir o mejorar el color (Yilmaz, 2022). Algunos colorantes alimentarios, como el Rojo 3 (eritrosina) y Amarillo 5 (tartrazina), han mostrado efectos disruptores endocrinos en modelos animales (Paramasivam et al., 2024). Existe evidencia científica de que antioxidantes como el butilhidroxitolueno (BHA) y butilhidroxianisol (BHT), utilizados en aceites y productos de cereales, afectan el eje gonadotropo en estudios *in vitro* (Yilmaz, 2022).

Algunos edulcorantes artificiales, como el aspartamo y el acesulfamo de potasio, también presentan propiedades de EDCs; estos compuestos pueden interferir con la liberación y actividad de hormonas clave como la insulina, leptina y grelina, además, se ha observado que afectan negativamente en la composición y función de la microbiota intestinal, lo que también influye en la regulación hormonal y en el metabolismo corporal (Paramasivam et al., 2024).

Los metales pesados (elementos con densidad $>5 \text{ g/cm}^3$) como el mercurio (Hg), el arsénico (As), el plomo (Pb) y el cadmio (Cd), también actúan como EDCs y se encuentran presentes en el suelo y agua, se incorporan a la cadena alimentaria y representan riesgos por sus efectos cancerígenos y neurotóxicos (Yilmaz, 2022). Su exposición ocurre mediante el consumo de alimentos contaminados, bebidas alcohólicas, tabaco, suplementos dietéticos, aire y agua; por ser liposolubles, se acumulan en el organismo (Liu et al., 2023). El Hg, por ejemplo, puede contaminar el agua, suelo y aire, ingresando al cuerpo humano a través de la ingestión de pescado contaminado, el Cd mediante la dieta, consumo de agua y tabaco, y el As a través del agua potable y alimentos con alto contenido lipídico (Liu et al., 2023).

Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) son compuestos químicos persistentes en el ambiente por su resistencia a la degradación, se utilizan ampliamente en productos de consumo resistentes al aceite y al agua, como espumas contra incendios y surfactantes industriales; además, debido a su uso extendido, los PFAS se han detectado en el aire, suelo y agua a nivel mundial (Vandenberg, 2021).

Por último, los pesticidas se aplican comúnmente para el control de plagas agrícolas y vectores, entre los compuestos más utilizados, se encuentra el clorpirifos. Estos químicos, aunque eficaces para el manejo fitosanitario, frecuentemente contaminan los cultivos alimentarios, representando una fuente adicional de EDCs (Díaz-Vallejo et al., 2021).

La cantidad de compuestos identificados como disruptores endocrinos es extraordinariamente amplia y diversa, por lo cual la presente revisión se centró en aquellos EDCs que han recibido mayor atención científica. En la siguiente sección se describen los diferentes mecanismos moleculares de acción que explican los efectos adversos de EDCs sobre distintos ejes hormonales.

3.3. Mecanismos de acción de EDCs (fundamentos moleculares)

Una vez ingeridos, los EDCs pueden ser absorbidos a nivel intestinal y pasar al torrente sanguíneo (Arias et al., 2020). Al igual que las hormonas endógenas, los EDCs pueden ejercer efectos biológicos incluso a concentraciones extremadamente bajas, lo que representa un reto para su evaluación toxicológica y regulación. Estos compuestos pueden alterar la acción de las hormonas mediante múltiples mecanismos, entre los mecanismos más relevantes se encuentra la interferencia con proteínas transportadoras, lo que afecta la disponibilidad y distribución hacia sus órganos blanco (Plunk y Richards, 2020). Además, pueden competir con hormonas endógenas por la unión a sus receptores (actuando como antagonistas o agonistas parciales), provocando la activación inapropiada o inhibición de señales hormonales, tanto a nivel de receptores de membrana como nucleares (Guarnotta et al., 2022). Además, pueden modificar la expresión génica mediante alteraciones en las histonas, ocasionando efectos duraderos sobre la función endocrina, incluso en generaciones posteriores (Marconetto et al., 2022). También se ha observado que interfieren directamente en la

síntesis, secreción y metabolismo hormonal en distintos niveles de los ejes endocrinos (Kumar et al., 2020; Heshmati, 2020).

En la siguiente sección se describe cómo estos mecanismos moleculares se traducen en alteraciones funcionales específicas sobre los distintos ejes hormonales, ilustrando de qué manera los EDCs interfieren con la señalización, regulación y función de cada sistema hormonal.

3.4. Ejes hormonales afectados por los EDCs

Las respuestas neuroendocrinas derivadas de la interacción entre los distintos ejes hipotálamo-hipófisis constituyen el núcleo del control endocrinológico en los organismos; la comunicación entre estos ejes y sistemas periféricos permite el funcionamiento integral de órganos y sistemas (Plunk y Richards, 2020), que regulan funciones esenciales como el crecimiento, metabolismo, reproducción, respuesta inmunológica y estrés, entre otras (Plunk y Richards, 2020). Este control se ejerce mediante la liberación equilibrada de neurotransmisores y hormonas, proceso fundamental para mantener la homeostasis y permitir que el organismo se adapte a los cambios internos y externos que enfrenta diariamente (Plunk y Richards, 2020).

Los ejes neuroendocrinos interactúan de manera estrecha con múltiples sistemas del cuerpo, incluyendo los sistemas inmunológico, cardiovascular, óseo y digestivo (Vilches y Legarralde, 2021). Por tanto, cualquier alteración en la señalización o liberación hormonal puede estar relacionada con una amplia gama de enfermedades (Vilches y Legarralde, 2021).

La exposición a EDCs puede interferir con la producción, liberación, señalización y acción de hormonas, afectando no solo a los ejes de forma individual, sino también a la interacción entre ellos (Kumar et al., 2020). Esto puede provocar trastornos en el desarrollo, enfermedades metabólicas, disfunciones reproductivas, entre otros efectos adversos (Kumar et al., 2020). Los EDCs tienen la capacidad de imitar, bloquear o alterar la acción hormonal endógena, provocando disrupciones en las funciones fisiológicas del sistema endocrino (Demir et al., 2025).

En este contexto, el concepto de exposoma, que engloba todas las exposiciones ambientales a lo largo de la vida, se ha posicionado como una herramienta clave para entender el impacto de EDCs en la salud humana (Rannaud-Bartaire, 2022). Aunque la evidencia sobre los efectos nocivos de estos compuestos es cada vez mayor, su incorporación en la práctica médica aún es limitada, lo que dificulta establecer vínculos claros entre enfermedades y factores ambientales (Rannaud-Bartaire, 2022). No obstante, integrar la evaluación de EDCs en la clínica podría mejorar el diagnóstico temprano y el tratamiento de enfermedades no transmisibles (Rannaud-Bartaire, 2022).

3.4.1. Eje Hipotálamo Neurohipófisis

El eje hipotálamo-neurohipófisis tiene como función principal mantener la regulación y equilibrio de niveles hormonales hipofisarios, que coordinan diversas funciones del organismo (Engelman et al., 2004). Entre estas funciones se incluyen el control autónomo, control endocrino, neurosecreción, termorregulación, regulación de la ingesta alimentaria y de la sed, la homeostasis energética, el efecto analgésico, regulación emocional y conductual, así como la implicación en la memoria y control de los ritmos circadianos (Engelmann et al., 2004).

El hipotálamo se divide en cuatro regiones: preóptica, supraóptica, tuberal y mamilar, y en tres zonas: periventricular, medial y lateral (Campbell y Jialal, 2022). Los núcleos hipotalámicos principales se agrupan en tres tipos: periventriculares (6 núcleos), mediales (7 núcleos) y laterales (5 núcleos), siendo los más involucrados en la regulación hipofisaria los de la región medial (Engelmann et al., 2004).

Las hormonas neurohipofisarias se secretan por las neuronas magnocelulares, ubicadas en los núcleos supraóptico y paraventricular del hipotálamo, no por la neurohipófisis misma (Senanayake et al., 2023). Los axones amielínicos de las neuronas magnocelulares forman los tractos supraóptico-hipofisario y paraventricular-hipofisario, que integran el haz hipotalámico-hipofisario, compuesto por aproximadamente 100,000 axones. La oxitocina (OT) se produce en el núcleo hipotalámico paraventricular y la vasopresina (ADH) en el núcleo supraóptico (Senanayake et al., 2023).

Las alteraciones en el hipotálamo pueden alterar el eje hipotálamo-hipofisario, lo que puede tener consecuencias sobre el control autonómico, metabólico y neuropsiquiátrico (Senanayake et al., 2023). En particular, las disfunciones en la secreción de vasopresina y oxitocina se han relacionado con trastornos como la depresión y el trastorno del espectro autista (Senanayake et al., 2023).

En un estudio realizado en ratas *Wistar* embarazadas, se evaluó el efecto de octabromodifenilo DE-79 (octaBDE DE-79) sobre el sistema vasopresinérgico, las ratas fueron estudiadas desde el día 6 de gestación hasta el día 21 postnatal, administrándoles dosis de 0 (control), 1.7 (baja) o 10.2 (alta) mg/kg/día (Álvarez-González et al., 2020). Se observó un aumento en la inmunorreactividad a vasopresina, asociado a una mayor osmolaridad sérica y mayor expresión génica en los núcleos paraventricular y supraóptico, con un incremento en los niveles circulantes de vasopresina (Álvarez-González et al., 2020). La magnitud de los efectos dependió de la dosis de octaBDE DE-79 y de la presencia de un estímulo hiperosmótico crónico (Álvarez-González et al., 2020).

En otro ensayo realizado en ratas expuestas prenatalmente a una mezcla de bifenilos policlorados (Aroclor 1221, benzoato de estradiol y dimetilsulfóxido), se observó el efecto de estos EDCs durante las semanas 16 y 18, las cuales son periodos de tiempo críticos para la diferenciación sexual de ratas, ya que es en este momento en el que se desarrollan las neuronas de oxitocina y vasopresina (Reilly et al., 2021). La exposición prenatal transitoria no cambió el número de neuronas secretoras de vasopresina y oxitocina en las regiones hipotalámicas, sin embargo, la expresión genética de oxitocina se vio afectada en los machos (más alta en aquellos con Aroclor 1221) y la de vasopresina en las hembras (más alta en aquellas con benzoato de estradiol), por lo que se concluyó que la exposición temprana a EDCs puede provocar pequeños cambios en los sistemas hipotalámicos que podrían producir resultados conductuales y funcionales biológicamente relevantes (Reilly et al., 2021).

Por otra parte, la exposición de ratas a BPA a través de agua potable (1 mg/L) durante etapas del desarrollo alteró la organización y función de las vías de vasopresina y oxitocina (Patisaul, 2017). Las ratas del estudio presentaron mayor ansiedad, la cual mejoró cuando se realizó una intervención con una dieta rica en soya (hormonalmente activa, ya que contiene fitoestrógenos) (Patisaul, 2017). En otro ensayo en ratas, la exposición a BPA disminuyó los niveles de expresión de los genes *ERβ* y *Mc4r* en la amígdala, que están implicados en la regulación y liberación de vasopresina y oxitocina (Patisaul, 2017).

Respecto a estudios realizados en humanos, los retardantes de llama bromados (BFRs, *por sus siglas en inglés*) pueden provocar alteraciones endocrinas y efectos neurotóxicos en humanos (León-Olea et

al., 2023). Se ha demostrado que estos compuestos interrumpen la producción, liberación, transporte y metabolismo de varias hormonas en el eje hipotálamo-hipofisario, afectando tanto la adenohipófisis como la neurohipófisis, y actúan sobre los receptores hormonales y sus vías de señalización descendentes (León-Olea et al., 2023).

3.4.2. Eje Corticotropo

El eje corticotropo regula la respuesta del organismo al estrés y contribuye al mantenimiento de la homeostasis a través del eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal (HHS) (Rodríguez-Fernández et al., 2013). Al ser activado por la hormona liberadora de corticotropina (CRH) secretada por el hipotálamo, la hipófisis libera la hormona ACTH, que a su vez induce la liberación de glucocorticoides desde la corteza de las glándulas suprarrenales (Rodríguez-Fernández et al., 2013).

La ACTH se une a proteínas transportadoras para alcanzar su destino y facilitar la liberación de cortisol. Este último desempeña un papel central en la regulación y control de respuestas al estrés y modulación de diversos procesos fisiológicos, afectando órganos y tejidos como el hígado, el tejido adiposo y el sistema inmunológico (Hall y Hall, 2021). Esto lo realiza a través de receptores específicos como los receptores de hormona liberadora de corticotropina, los receptores de melanocortina 2 y los receptores de glucocorticoides (Tresguerres, 2010; Hall y Hall, 2021). Este eje endocrino se encuentra bajo el control del ciclo circadiano, regulado por el núcleo supraquiasmático en el hipotálamo, que responde a estímulos luminosos captados por el nervio óptico, la luz solar estimula la liberación de CRH y ACTH en hipotálamo e hipófisis, respectivamente, lo que resulta en la producción de cortisol por las glándulas suprarrenales (Maidana et al., 2013). De esta manera, el nivel de cortisol en plasma alcanza su pico al despertar y disminuye progresivamente durante el día hasta alcanzar su nivel más bajo durante las primeras horas del sueño (O'Byrne et al., 2021).

En modelos *in vitro*, se ha relacionado al BPA con la modulación de los receptores de glucocorticoides, ya que este compuesto puede activar el receptor y estimular la adipogénesis en células 3T3-L1 (línea celular de fibroblastos) (Sonavane y Gassman, 2019; Pötzl et al., 2024).

Una revisión sistemática analizó evidencia en humanos y otros modelos animales, y concluyó que diversos EDCs, como el BPA y pesticidas como el clorpirifos, pueden alterar significativamente la función del eje corticotropo (Pecori-Giraldi et al., 2024). Estos compuestos pueden interferir con receptores de hidrocarburo de arilo (AHR), que actúan como factores de transcripción implicados en múltiples procesos, entre ellos el metabolismo energético, la detoxificación de xenobióticos, la regulación celular y la respuesta inmunitaria (Vogel et al., 2020). La acumulación de ligandos lipofílicos en estos receptores puede afectar la esteroidogénesis y la secreción de cortisol, fundamentales para la respuesta al estrés y la homeostasis (Pecori-Giraldi et al., 2024). La disfunción sostenida del eje corticotropo se ha relacionado con patologías como la obesidad, caracterizada por una secreción anormal y sostenida de cortisol y ACTH (Pecori-Giraldi et al., 2024).

Se han medido los niveles de cortisol de acuerdo con la exposición a pesticidas; en un estudio con agricultores que utilizaban pesticidas convencionales y orgánicos, se observaron niveles de cortisol significativamente más bajos al despertar en aquellos expuestos a pesticidas convencionales (3.39 frente a 3.86 ng/mL), así como una pendiente diurna de cortisol más baja (-2.26 frente a -2.51 ng/mL) (Kongtip et al., 2021). Además, se encontró una asociación entre la frecuencia de uso de herbicidas e

insecticidas y una menor respuesta de cortisol a lo largo del día, en especial en quienes se encontraban en el percentil 90 o superior de días de aplicación de herbicidas (Kongtip et al., 2021).

En otro estudio, mujeres trabajadoras rurales diagnosticadas con cáncer de mama y antecedentes de contacto directo con pesticidas (glifosato y atrazina), presentaron niveles significativamente más altos de cortisol ($45.7 \pm 0.8 \mu\text{g/dL}$) en comparación con mujeres no expuestas ($27.6 \pm 0.9 \mu\text{g/dL}$) (Jumes et al., 2024). Los niveles de cortisol fueron incluso más elevados en pacientes con tumores mayores de 2 cm, metástasis ganglionares y mal pronóstico ($45.7 \pm 0.8 \mu\text{g/dL}$ frente a $19.6 \pm 5.21 \mu\text{g/dL}$), lo que sugiere una posible asociación entre la exposición a pesticidas, la disfunción del eje corticotropo y la progresión tumoral (Jumes et al., 2024).

3.4.3. Eje Gonadotropo

El eje gonadotropo es un sistema de regulación hormonal formado por el hipotálamo, hipófisis y gónadas (testículos en hombres y ovarios en mujeres), cuya función principal es la regulación de la producción de hormonas sexuales y funcionamiento reproductivo en ambos sexos; la regulación se inicia con la liberación de la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH), secretada por neuronas parvocelulares del hipotálamo (Ge et al., 2024). La GnRH actúa sobre la adenohipófisis, estimulando la liberación de la LH y la FSH, las cuales ingresan al torrente sanguíneo (Marques et al., 2024). Posteriormente, estas hormonas actúan sobre las gónadas: en los testículos inducen la producción de testosterona e inhibina, mientras que en los ovarios estimulan la secreción de estradiol, progesterona, testosterona e inhibina (Marques et al., 2024).

Diversos EDCs pueden alterar el eje gonadotropo, entre estos se incluyen fitoestrógenos, estrógenos (sintéticos y naturales), pesticidas, productos químicos industriales, metales pesados y ftalatos, todos ellos con capacidad de alterar el desarrollo puberal en humanos (Ge et al., 2024). Estos compuestos ejercen sus efectos mediante mecanismos estrogénicos, antiestrogénicos, androgénicos, antiandrogénicos, o bien a través de una acción directa sobre la secreción de GnRH, lo que incrementa la producción endógena de estrógenos y favorece la pubertad precoz (Özen y Darcan, 2011; Ge et al., 2024).

Además, los EDCs interfieren con el eje hipotálamo-pituitario-gonadal (HPG) provocando problemas severos de la salud reproductiva, afectando la fertilidad y el balance hormonal (Stanojlović et al., 2023). Uno de los mecanismos para la alteración de este eje es la interacción directa con los receptores hormonales, los EDCs imitan o bloquean la acción natural de las hormonas al unirse a sus receptores de estrógeno, andrógeno y progesterona, provocando alteraciones en las rutas señalizadoras (Gupta et al., 2021; Stanojlović et al., 2023). Otro mecanismo ocurre a través de efectos neuroendocrinos, donde los EDCs afectan la liberación de la GnRH que interfiere con la homeostasis del eje (Gore, 2001; Gupta et al., 2021).

Por otra parte, en un estudio *in vitro* se observó el efecto del aditivo alimentario BHA en una línea celular de ratas (3T3-L1) (Yilmaz, 2022). El BHA redujo los niveles de andrógenos al activar a la enzima que se encuentra en las células de Leydig CYP17A1 y, por otra parte, estimuló la adipogénesis a través de la vía PPAR γ (Yilmaz, 2022).

En ratas macho, el BPA inhibió la producción de adenosín trifosfato (ATP), probablemente debido a la alteración mitocondrial que provoca una disminución de la motilidad espermática (Rahman et al.,

2017). En ratones hembra adultos, la salud de los folículos ováricos se vio afectada negativamente por los ftalatos; la exposición a di-(2-etilhexilo) (DEHP) (750 mg/kg/día) *in vivo* durante 10 a 30 días aceleró el reclutamiento de folículos primordiales mediante un mecanismo que involucra la sobreactivación de la vía de la fosfatidilinositol 3-quinasa (PI3K) (Hannon et al., 2014).

En otro estudio realizado en ratas hembra, la exposición oral a DEHP (600 mg/kg) durante 60 días consecutivos disminuyó el número de folículos primarios y secundarios y aumentó los folículos atrésicos. Esto puede deberse al incremento de células de la granulosa apoptóticas inducido por DEHP (Ghosh et al., 2022). Otro ejemplo de disrupción de hormonas LH y FSH se relaciona con la exposición a mono-(2-etilhexil) ftalato (MEHP), el cual afecta la salud folicular al inducir estrés oxidativo, aumentando los niveles de especies reactivas de oxígeno y alterando la expresión y actividad de antioxidantes superóxido dismutasa 1 (SOD1) y glutatión peroxidasa (GPX), resultando en la inhibición del crecimiento de folículos antrales en ratones inducida por MEHP (Wang et al., 2012).

También, en un trabajo realizado en ratones macho de 6 semanas de edad divididos aleatoriamente en 3 grupos (control, exposición a arsénico a una concentración de 5 mg/dL y de 15 mg/dL) durante 60 días, se encontró que los ratones expuestos a As a dosis de 15 mg/dL, disminuyeron significativamente el número de espermatozoides maduros en comparación con el grupo control y con el grupo expuesto a la menor dosis (5 mg/dL) (Li et al., 2023). El mecanismo exacto aún se desconoce, pero se ha relacionado con la alteración del eje HHG y con estrés oxidativo, ya que la acumulación de especies reactivas de oxígeno inducida por As contribuye a reducir la actividad de mTORC2 (Li et al., 2023).

En hombres, se ha informado que el BPA genera especies reactivas de oxígeno, las cuales a su vez van a interferir con el funcionamiento correcto del hipotálamo. Un primer efecto observado es la disminución de la secreción de la GnRH, afectando la secreción de LH y con ello la secreción de testosterona, lo que provocará una disminución de la proliferación y función de las células de Leydig. Por otro lado, al disminuir la secreción de la FSH, se afecta la secreción de la hormona inhibina B, causando una disminución en el número y función de las células de Sertoli, con la consiguiente reducción en la concentración del recuento de espermatozoides, motilidad y viabilidad, dañando la fertilidad masculina (Gupta et al., 2021).

Los EDCs también tienen un impacto negativo en la salud reproductiva de las mujeres, al reducir los índices de fertilidad, provocar irregularidades en los ciclos menstruales y, en los hombres, al alterar la morfología del esperma (Dickerson y Gore, 2007; Plunk y Richards, 2020).

Estudios en mujeres indican que algunas patologías ováricas parecen estar relacionadas con la exposición a PCB, ftalatos, atrazina, genisteína, BPA, parabenos, triclosán, diclorodifeniltricloroetano (DDT) y metoxicloruro (MXC). Estos EDCs pueden estar relacionados con la aparición de endometriosis, que se presenta en el 10 % de las mujeres fértiles y causa infertilidad en el 50 % de las afectadas (Mínguez-Alarcón y Gaskins, 2017).

Otro ejemplo de EDCs que afectan el eje gonadal son los metales pesados, dentro de los cuales se incluyen Pb, Cd, As, Hg, Cu, Ni, Zn y Mn (Liu et al., 2023). La exposición crónica al As interfiere con los niveles de estrógeno, como el estradiol (E2), la progesterona (P), la hormona luteinizante (LH), el estrógeno folicular (FSH), la hormona liberadora de gonadotropina (GnRH), la PRL hipofisaria y el cortisol en ratas hembra (Guo et al., 2011). Otro ejemplo es que la exposición al cloruro de mercurio

(HgCl_2) provoca una disminución de la calidad del esperma, la tasa de embarazo, el tamaño medio de la camada y la tasa de supervivencia en ratones macho (Liu et al., 2023).

En estudios realizados en humanos, la exposición prenatal y posnatal al Hg se asoció significativamente con los niveles reducidos de testosterona y el estadio de Tanner > 1 en niños (Sarzo et al., 2022). En relación con el Pb, la exposición a este metal se asocia positivamente con hormonas sexuales como la testosterona y la globulina transportadora de hormonas sexuales en humanos. Mientras que el Cd se considera un disruptor estrogénico que imita las acciones o funciones biológicas de las hormonas estrogénicas, en particular el Cd^{2+} y el Co^{2+} pueden sustituir al Zn^{2+} en el dominio de unión al ADN del dedo de zinc de los receptores de estrógeno para asociarse con la respuesta estrogénica (Kortenkamp, 2011).

3.4.4. Eje Lactotrope

El eje lactotrope tiene como función principal estimular la producción de leche en las glándulas mamarias; la hormona central de este eje, la PRL, es producida por la adenohipófisis y actúa sobre células acinosas de glándulas mamarias, promoviendo el desarrollo de alvéolos y ductos necesarios para la síntesis y secreción láctea (Hernández-Guzmán et al., 2022). Durante el embarazo, los niveles elevados de PRL inducen el crecimiento y maduración del tejido glandular mamario, preparando así al organismo para la lactancia (González-Castell et al., 2024). Tras el parto, la secreción de PRL se mantiene como un factor clave para sostener la producción láctea, en respuesta al estímulo mecánico generado por la succión del lactante (Utiger, 2024).

Además de su papel en la lactancia, la PRL cumple funciones relevantes en la reproducción y regulación de la homeostasis corporal, entre sus acciones destacan los efectos inmunorreguladores, que se manifiestan tanto directa como indirectamente, mediante la promoción del desarrollo y maduración de las células del timo y de órganos linfoides periféricos (Pérez, 2019). El receptor de PRL se localiza en la membrana celular y el aparato de Golgi de tejidos como la glándula mamaria y el ovario, y también se distribuye en el cerebro, hipófisis, corazón, pulmón, timo, páncreas e hígado, donde participa en procesos de señalización y proliferación (Standing et al., 2022).

Las alteraciones fisiopatológicas relacionadas con la PRL pueden derivarse tanto de su deficiencia como de su secreción excesiva, siendo su concentración sérica un parámetro esencial para establecer y mantener una lactancia eficaz (Al-Chalabi, 2023). Concentraciones insuficientes de PRL impiden la producción adecuada de leche materna, mientras que niveles elevados de la hormona pueden dar lugar a galactorrea, incluso en mujeres no lactantes y en hombres (Al-Chalabi, 2023). La disminución de la PRL suele asociarse con una insuficiencia hipofisaria global, como el hipopituitarismo (Utiger, 2024). En contraste, la hiperprolactinemia puede originarse por la interrupción del control inhibitorio dopaminérgico desde el hipotálamo hacia las células lactotropas, lo cual ocurre típicamente en lesiones del tallo hipofisario (Al-Chalabi, 2023). También puede deberse a tumores secretores de prolactina, como los prolactinomas, o a patologías sistémicas, entre las cuales la disfunción tiroidea destaca como una causa relevante (Standing et al., 2022; Utiger, 2024).

Diversos factores ambientales pueden afectar la homeostasis del eje lactotrope, afectando así la síntesis y liberación de PRL (Al-Chalabi, 2023). Por ejemplo, los antipsicóticos típicos, como el haloperidol y la flufenazina, pueden inducir galactorrea y ginecomastia, al bloquear la acción de la dopamina (Al-Chalabi, 2023). Este efecto se debe a la inhibición no selectiva de los receptores

dopaminérgicos D2 en diversas vías neuronales, incluyendo la vía tuberoinfundibular, donde la dopamina ejerce una inhibición tónica sobre la secreción de PRL, al perderse este control, se produce una activación no regulada de las células lactotropas (Pérez, 2019; Al-Chalabi, 2023).

Entre los EDCs más estudiados, el BPA y ftalatos han mostrado aumentar la concentración de PRL y/o la población de células lactotropas en animales expuestos durante el desarrollo (Pérez, 2019). Se ha propuesto que estos efectos se deben a la interferencia de estos EDCs en la secreción de estrógenos, como el estradiol, el cual induce la proliferación de lactotropos y secreción de la PRL. Además, el BPA altera directamente la función de la glándula mamaria e interfiere en la señalización normal de PRL, lo que podría acelerar la involución de la glándula mamaria y retrasar el inicio de la lactancia (Pérez, 2019; Criswell et al., 2020). Otro mecanismo plausible sugiere que los EDCs alteran la regulación dopaminérgica de PRL al modificar la sensibilidad de los receptores dopaminérgicos, afectando la expresión de estos receptores y la modulación de vías de señalización intracelular (Dobolyi et al., 2020; Ge et al., 2024).

Asimismo, se ha observado que la exposición a sustancias PFAS en ratones reduce la duración de la lactancia, así como la diferenciación glandular y la señalización de PRL y lactógeno placentario, hormonas esenciales para la diferenciación epitelial mamaria y producción de leche (Criswell et al., 2020). De igual modo, la exposición prenatal y durante la lactancia a herbicidas basados en glifosato (350 mg/kg/día) elevó los niveles de PRL en ratas macho adultas (Gomez et al., 2019).

Por otro lado, estudios recientes en Sudáfrica y Chiapas (México), donde aún se utiliza DDT para el control de vectores y en actividades agrícolas, no encontraron asociación entre la exposición a este pesticida o sus metabolitos y la duración de la lactancia materna (Weldon et al., 2010; Bouwman et al., 2012). En Sudáfrica se midió la exposición en la leche materna entre los días 14 y 487 posparto, mientras que, en Chiapas, la medición se realizó en suero materno al día siguiente al parto (Weldon et al., 2010; Bouwman et al., 2012).

3.4.5. Eje Tirotropo

En el eje hipotálamo-hipófisis-tiroides (HPT) se secreta la TRH del hipotálamo, la TSH, de la hipófisis, y las hormonas tiroxina (T4) y triyodotironina (T3), de la glándula tiroides (Wu et al., 2021). La adenohipófisis, bajo la influencia de la TRH del hipotálamo, sintetiza la TSH; esta hormona actúa sobre la glándula tiroides para regular la producción de T3 y T4, que a su vez actúan sobre la hipófisis y el hipotálamo para inhibir la liberación de TSH y TRH, respectivamente (Peluso et al., 2023).

La secreción de TSH sigue un ritmo circadiano con un pico nocturno, mientras que la biosíntesis y secreción de hormonas tiroideas depende de reservas y absorción de yodo por las células foliculares tiroideas (Santiago-Peña, 2020). La expresión de genes asociados con el desarrollo tiroideo es mediada por vías de quinasas, incluidas las acciones de la proteína de caja emparejada 8 (PAX-8), el importador de yoduro de sodio (NIS), el factor de transcripción tiroideo 1 (TTF-1), el transportador de yoduro pendrina (PDS) y la peroxidasa tiroidea (TPO) (Santiago-Peña, 2020; Wu et al., 2021).

La T3, la forma metabólicamente activa, se produce a partir de la conversión de T4 a través de la 5-desyodinasas tipo I en los tejidos periféricos; las hormonas tiroideas se unen ampliamente a proteínas plasmáticas, con solo 0.3 % de T3 y 0.02 % de T4 libre; los rangos normales en adultos sanos (no

embarazadas) son: TSH de 0.3 a 4.7 $\mu\text{g/L}$, T4 libre de 5-11 $\mu\text{g/dl}$ y T3 libre de 75-175 $\mu\text{g/dl}$, valores que pueden variar durante el embarazo y en diferentes grupos etarios (Santiago-Peña, 2020).

Las hormonas tiroideas actúan en casi todos los tejidos del organismo a nivel nuclear, ya que tienen funciones fisiológicas involucradas en la regulación del metabolismo, desarrollo del sistema nervioso y termogénesis, acciones que se dan a partir de receptores celulares α y β , que reconocen a las hormonas en cada órgano (Santiago-Peña, 2020; Peluso et al., 2023).

Se ha encontrado que la exposición a los EDCs puede asociarse a varios desórdenes en la función tiroidea, entre ellos el hipotiroidismo, al alterar la comunicación hormonal y el metabolismo (Derakhshan et al., 2021). La exposición a DEHP altera la expresión de genes involucrados en el eje HPT, el transporte, metabolismo y acción de la hormona tiroidea, causando disfunción tiroidea (Derakhshan et al., 2021).

En un estudio realizado en ratas, la administración intragástrica de DEHP (150, 300 y 600 mg/kg) durante 90 días consecutivos demostró que el estrés oxidativo inducido por este compuesto aumenta el diámetro de la cavidad folicular tiroidea, provocando edema tiroideo (Wu et al., 2021). Adicionalmente, la exposición a DEHP alteró la expresión génica y proteica, perturbando la homeostasis tiroidea mediante múltiples mecanismos: afectó la biosíntesis hormonal, biotransformación, transporte, niveles de receptores y metabolismo del eje HPT, así como la activación de la vía de señalización del receptor de la hormona TSH (Wu et al., 2021).

En otro estudio con ratas *Wistar*, se compararon un grupo control y otro experimental. Al primero se le administró aceite de maíz y al segundo aceite de maíz con DEHP en dos dosis diferentes (0.48 y 4.8 mg/kg/día) durante todo el embarazo de la rata. Los resultados mostraron que dosis altas del disruptor endocrino estuvieron implicadas en la disminución de niveles séricos de TSH y reducción de la expresión génica y/o contenido proteico de varios genes y proteínas importantes relacionadas con la glándula tiroidea (Sousa-Vidal et al., 2023).

Los pesticidas organofosforados como clorpirifos han demostrado afectar el eje tirotrópico. En un estudio se investigó el deterioro de dos procesos importantes: la señalización de hormonas tiroideas y el metabolismo de lípidos y glucosa en el hígado de ratones de seis meses de edad, expuestos durante el desarrollo y de por vida a 0.1, 1 y 10 mg/kg/día de clorpirifos, y sus crías expuestas de manera similar (Peluso et al., 2023). Se analizaron los niveles de transcripciones de enzimas involucradas en el metabolismo de T3, lípidos y glucosa. Ambos procesos se alteraron solo en machos, afectados por hipotiroidismo y por una hiperglucemia sistémica ligada a la activación de la gluconeogénesis en ratones expuestos a 1 y 10 mg/kg/día de clorpirifos (Peluso et al., 2023).

Los metales pesados, como el Cd, también pueden afectar la función tiroidea. En un estudio realizado en ratones macho C57BL/6 de cuatro semanas de edad, expuestos por vía intragástrica a cloruro de cadmio (2- 7 mg/kg) durante 4 a 8 semanas, se observó que dicho compuesto inducía tirototoxicidad, relacionada con la promoción de la piroptosis en las células foliculares tiroideas, así como con alteraciones en la morfología folicular y en la función endocrina de la glándula tiroidea (Chen et al., 2023).

En humanos, se ha planteado la hipótesis de que los EDCs pueden afectar la función de las células tirotropas, lo cual podría ocasionar alteraciones a nivel de retroalimentación de la TRH del hipotálamo y de la TSH de la hipófisis, junto con una interferencia en la señalización del receptor de

la hormona tiroidea (Sousa-Vidal *et al.*, 2023). La disfunción tiroidea está relacionada con el síndrome de ovario poliquístico (SOP) y la endometriosis, dos patologías comunes que pueden interferir con la fertilidad humana (Ge *et al.*, 2024). Esta interrelación es particularmente relevante considerando los efectos previamente descritos de los EDCs sobre el eje hipotálamo-hipófisis-gónadas, sugiriendo que la disrupción endocrina puede afectar múltiples sistemas hormonales de manera simultánea, potenciando así los efectos adversos sobre la función reproductiva.

En cuanto a aditivos alimentarios, el colorante conocido como eritrosina puede interferir con la absorción de yodo por la glándula tiroides y causar disminución de la síntesis y secreción de hormonas tiroideas; además, se ha relacionado con interferencia en la señalización hormonal en humanos (Paramasivam *et al.*, 2024).

Respecto a metales pesados, un estudio en trabajadores de fundición expuestos al Pb reveló que el grupo con mayor exposición (59 trabajadores en áreas de alta concentración de plomo) presentaba niveles significativamente más altos de Pb en sangre, de T3 y T4, y una disminución de la hormona TSH comparados con 28 hombres sin antecedentes de exposición al Pb ni anomalías tiroideas, que sirvieron como grupo de control. El grupo de mayor exposición también mostró niveles elevados de malondialdehído (MDA), un indicador de estrés oxidativo, y niveles reducidos de glutatión (GSH), un antioxidante, en comparación con el grupo control. Estos hallazgos sugieren una posible relación entre la exposición al Pb, las alteraciones de la función tiroidea y el aumento del estrés oxidativo en estos trabajadores (Liu *et al.*, 2023).

En otra investigación se realizó una medición de Cd y Pb en sangre, anticuerpos antiperoxidasa tiroidea, anticuerpos antitiroglobulina y hormona estimulante de la tiroides, en 2877 sujetos (2035 mujeres, 842 hombres) de 18 a 75 años. Se investigó la asociación entre la exposición a Pb y Cd, el estado del yodo y los trastornos tiroideos. Los resultados demostraron que las mujeres presentaron un riesgo significativamente mayor de desarrollar autoinmunidad tiroidea en comparación con los hombres, con odds ratios (OR) que variaron desde 2.2 para anticuerpos antiperoxidasa tiroidea positivos hasta 5.0 para anticuerpos antitiroglobulina positivos (todos $p < 0.001$). Asimismo, las mujeres mostraron el doble de riesgo de hipotiroidismo (OR 2.197, IC 95 %: 1.550-3.114). Los niveles más altos de Pb en sangre (cuarto cuartil) se asociaron positivamente con autoinmunidad tiroidea y estado hipotiroideo, mientras que el Cd mostró asociación únicamente con autoinmunidad. La ingesta excesiva de yodo también se relacionó con mayor riesgo de autoinmunidad tiroidea e hipotiroidismo. Aunque el estudio incluyó participantes de ambos sexos con distribución detallada por grupos étnicos, no se realizaron análisis estratificados por sexo para evaluar si los efectos de los metales pesados difieren entre hombres y mujeres, lo que representó una limitación para la interpretación clínica de los hallazgos (Chen *et al.*, 2022).

3.4.6. Eje del Sistema nervioso y el tracto gastrointestinal (control del apetito – aumento)

La estimulación del apetito se origina en la comunicación entre el sistema nervioso y el tracto gastrointestinal, mediada por señales relacionadas con las reservas corporales, sensores de la distensión gástrica, hormonas y péptidos que provienen del tracto gastrointestinal y del sistema endocrino, como la grelina, las orexinas, la proteína agouti (AgRP) y el neuropéptido Y (NPY) (Calzada-León *et al.*, 2008). Estas señales llegan al núcleo arcuato, cuyas dendritas se comunican con

los núcleos paraventricular, dorsomedial y ventromedial coordinando así la ingesta y el gasto energético (Calzada-León et al., 2008; Rang et al., 2016).

El NPY, producido en el núcleo arcuato del hipotálamo, aumenta el depósito de tejido adiposo y reduce el gasto energético basal; al llegar al núcleo paraventricular, se une a los receptores Y1 (receptor del neuropéptido Y1) y Y5 (receptor del neuropéptido Y5), lo que incrementa la ingesta activando neuronas orexigénicas; su retroalimentación negativa depende de la presencia de leptina, la hormona liberadora de corticotropina y la histamina (Álvarez-Crespo et al., 2009). Por su parte, la AgRP también se produce en el núcleo arcuato y actúa como antagonista de las señales de los receptores de melanocortinas, promoviendo la ingesta de alimentos (González-Hita et al., 2006; Carranza-Quispe, 2016).

La grelina, producida principalmente en el estómago, se transporta en la sangre, unida a albúmina y a lipoproteínas de alta densidad, cruza la barrera hematoencefálica y estimula las neuronas productoras de AgRP y NPY, aumentando el consumo de alimentos a corto plazo (Álvarez-Crespo et al., 2009). La secreción de grelina es determinada por la presencia de nutrientes; en ausencia de alimentos, sus niveles plasmáticos aumentan, lo que inicia la ingesta, los receptores de esta hormona son el GHS-R1A (receptor secretagogo de la hormona del crecimiento 1A) y GHS-R1B (receptor secretagogo de la hormona del crecimiento 1B) (González-Hita et al., 2006; Calzada-León et al., 2008; Ayman et al., 2023).

En las distintas exposiciones ambientales que alteran la homeostasis del eje que regula el aumento del apetito están el consumo de nicotina y alcohol, considerados como EDCs (Al'Absi et al., 2021). La grelina y NPY pueden modular las respuestas al estrés y los efectos gratificantes producto del consumo de alcohol y cigarro (Koopmann et al., 2015).

El receptor de grelina GHS-R1A ha sido vinculado con mecanismos adictivos; este receptor se localiza en la vía de recompensa colinérgica-dopaminérgica, y su activación estimula la liberación de dopamina en regiones clave como la amígdala y el núcleo accumbens, lo que podría explicar el papel de la grelina en la adicción al cigarro (Ayman et al., 2023).

A largo plazo, el consumo de tabaco, que contiene nicotina, ácido cianhídrico, aldehído fórmico, metales pesados tóxicos como Pb, As y Cd y otros compuestos orgánicos volátiles, puede inducir una alteración en la regulación de la grelina (Al'Absi et al., 2021). En un estudio con 134 participantes se evaluaron los niveles de grelina y NPY en relación con el tabaquismo y las adversidades en la vida cotidiana; los resultados indicaron que en casos de recaída al consumo de tabaco, especialmente en individuos con antecedentes de violencia o abuso durante la infancia, los niveles de grelina eran significativamente más altos en comparación con quienes continuaban fumando o con aquellos que habían logrado dejar el tabaco; este incremento podría estar relacionado con un mecanismo neuroendocrino destinado a promover la búsqueda y el consumo de tabaco (Al'Absi et al., 2021).

Por otro lado, un estudio independiente con 84 participantes (54 fumadores y 30 no fumadores) mostró que la concentración plasmática de grelina acilada era mayor en los fumadores tres horas después del consumo de cigarrillos, en comparación con los no fumadores, sin observarse diferencias en los niveles de grelina total (Koopmann et al., 2015). Además, se identificó una correlación negativa entre los niveles de grelina acilada y cantidad de cigarrillos consumidos por día, lo cual sugiere una posible regulación compensatoria (Koopmann et al., 2015).

No obstante, estos hallazgos aún requieren mayor validación, se necesitan estudios con un tamaño de muestra más amplio y metodologías estandarizadas que permitan esclarecer con mayor precisión cómo interactúan la grelina y el tabaquismo con el eje del sistema nervioso-tracto gastrointestinal (Potretzke et al., 2022).

El consumo de alcohol también influye en la regulación de la grelina; en sujetos en abstinencia, la grelina se incrementa como refuerzo para la activación del comportamiento del consumo; a mayor concentración de grelina, mayor necesidad de alcohol, en particular en individuos con antecedentes de dependencia en etapas de abstinencia, en esta regulación intervienen otros elementos neuroreguladores como la orexina, las neuronas urocortinas y la vía de dopamina mesolímbica, considerada central en el desarrollo y mantenimiento de los trastornos adictivos (Leggio et al., 2012; Potretzke et al., 2022).

En un estudio prospectivo con 60 pacientes masculinos, de los cuales 30 presentaban diagnóstico de síndrome de dependencia al alcohol y se encontraban en estado abstinencia (última ingesta al menos 72 horas antes) se observó que estos presentaban concentraciones de grelina acilada plasmática en ayuno, significativamente más altas desde el inicio del estudio hasta el día 14, en comparación con el grupo control sin dependencia (grupo control) (Sha et al., 2021). De manera complementaria, el consumo diario de alcohol en individuos sin diagnóstico formal de trastorno por uso de alcohol, pero con un consumo sostenido durante al menos 12 meses, también mostró una asociación positiva con los niveles de grelina (Deschaine et al., 2022). Estas observaciones sugieren que las alteraciones en el eje sistema nervioso-gastrointestinal inducidas por el alcohol podrían estar relacionadas con una respuesta anticipatoria y aprendida, en la cual la secreción de grelina promueve la liberación de dopamina a través de la vía mesolímbica (Deschaine et al., 2022).

Es importante considerar que la susceptibilidad individual a estas alteraciones varía según factores como la edad y la predisposición genética. En particular, las variaciones genéticas en los receptores GHSR pueden afectar los procesos de recompensa neurobiológica y aumentar la vulnerabilidad al tabaquismo y consumo de alcohol (Suchankova et al., 2016; Özkan-Kotiloğlu et al., 2024). Sin embargo, aún se requieren más estudios para establecer con claridad la relación bidireccional entre el alcohol y el eje sistema nervioso-gastrointestinal, ya que existen reportes contradictorios que muestran niveles reducidos de grelina en personas con dependencia al alcohol; estas discrepancias pueden deberse a diferencias en el tipo de grelina evaluado (acilada o total), el momento de la toma de muestra y la metodología empleada (Ralevski et al., 2023). El conocimiento de estas interacciones es fundamental para el desarrollo de estrategias de prevención y tratamiento que consideren la alteración del eje neuroendocrino por los EDCs (Suchankova et al., 2016).

3.4.7. Eje del Sistema nervioso y el tracto gastrointestinal (control del apetito – disminución)

El eje del sistema nervioso y el tracto gastrointestinal (control del apetito - disminución) juega un rol crucial en el control del apetito y el equilibrio energético. Su funcionamiento está estrechamente relacionado con la leptina, una hormona clave en la homeostasis (González-Hita et al., 2006). Esta red de comunicación integra señales provenientes del sistema nervioso y digestivo para regular el apetito y preservar el balance energético del cuerpo (González-Hita et al., 2006; Calzada-León et al., 2008; Carranza-Quispe, 2016).

Diversos contaminantes ambientales han sido señalados como posibles disruptores endocrinos del funcionamiento de este eje. Por ejemplo, compuestos como el DDT y el tributilestano (TBT) se han asociado con alteraciones del metabolismo energético y el desarrollo de obesidad (Yavuz et al., 2023). Estudios en modelos murinos han mostrado que estos compuestos afectan la actividad de neuronas hipotálamicas sensibles a la leptina, especialmente en el núcleo dorsomedial del hipotálamo (DMH), una región clave en la regulación del apetito (Yavuz et al., 2023).

Por otra parte, se ha reportado que la exposición a DEHP puede reducir la producción de insulina en el páncreas, alterar la morfología y reducir el número de células beta pancreáticas, modificar los niveles de glucosa en sangre y favorecer el aumento de peso corporal y el desarrollo de esteatosis hepática (Dagar et al., 2023).

De igual forma, la exposición a clorpirifos altera directamente los niveles circulantes de leptina, promoviendo la acumulación de grasa y el incremento de peso corporal en ratones expuestos (Pérez-Bermejo et al., 2024).

En un estudio realizado en ratones C57Bl/6 y CD-1, alimentados con dietas normales o altas en grasas, el tratamiento con clorpirifos produjo un aumento en las concentraciones de glucosa en ayuno y niveles de insulina en la mayoría de los grupos, con excepción de la insulina en ayunas en los ratones C57Bl/6 con dieta normal en grasas y CD-1 con dieta alta en grasas. Además, se observó un incremento en el índice HOMA-IR en todos los grupos tratados, lo que sugiere una posible inducción de resistencia a la insulina (Liang et al., 2019). Los ratones expuestos a clorpirifos mostraron también una menor tolerancia a la glucosa y una sensibilidad a la insulina reducida en comparación con los grupos control alimentados con dieta normal en grasas (Liang et al., 2019). De forma similar, los ratones C57Bl/6 tratados con clorpirifos y dieta alta en grasas presentaron una disminución adicional en la sensibilidad a la insulina (Liang et al., 2019). Estos efectos metabólicos se acompañan de alteraciones en la integridad de la barrera intestinal: el clorpirifos aumenta la permeabilidad intestinal y disminuye la expresión de ARNm de proteínas de unión estrecha en el íleon y colon, en ratones C57Bl/6 y CD-1, esta disrupción facilita el paso de lipopolisacáridos hacia la circulación, promoviendo una respuesta inflamatoria sistémica que puede interferir con la señalización de la insulina e incrementar el riesgo de obesidad y diabetes (Liang et al., 2019).

Estas observaciones en modelos animales están respaldadas por evidencia emergente en humanos; se ha propuesto una relación significativa entre el funcionamiento del eje sistema nervioso-tracto gastrointestinal (particularmente en su vía anorexigénica) y el desarrollo de obesidad (García-Mayor et al., 2012). Los EDCs juegan un papel importante en el incremento de la prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles, particularmente formas de obesidad con alteraciones metabólicas anormales y en la enfermedad hepática por acumulación de grasa no alcohólica (MASLD, *por sus siglas en inglés*) (García-Mayor et al., 2012).

Existe la hipótesis de que la calidad de la nutrición en etapas críticas como el periodo prenatal y la infancia tiene un impacto decisivo en la salud futura (García-Mayor et al., 2012). Durante etapas críticas del desarrollo, como la infancia, los EDCs pueden acumularse en tejidos como el hígado, donde contribuyen a una inflamación crónica de bajo grado y promueven resistencia a la insulina, eventos centrales en la fisiopatología de trastornos metabólicos (Mosca et al., 2024).

Uno de los compuestos más estudiados es el BPA, que ha demostrado inducir un aumento de tejido adiposo, efecto atribuido a su capacidad para inhibir la secreción de adiponectina, una adipocina con

funciones antiinflamatorias y sensibilizadoras a la insulina (Juan-García et al., 2015). En un estudio en el que se expusieron fragmentos de tejido adiposo humano (subcutáneo, visceral y mamario) y adipocitos maduros aislados a concentraciones bajas de BPA y estradiol, se observó una supresión significativa en la liberación de adiponectina (Hugo et al., 2008).

Además, una revisión sistemática y metaanálisis reciente encontró una asociación positiva entre la exposición a ftalatos de alto peso molecular, como el mono-n-butil ftalato (MnBP), el di DEHP, el monobencil ftalato (MBzP) y el mono (3-carboxipropil) ftalato (MCPP) y un incremento en el índice HOMA-IR, un marcador de resistencia a la insulina, en estudios realizados en humanos (Gao et al., 2021).

Los disruptores endocrinos ejercen efectos diferenciales sobre diversos ejes hormonales, como se ha detallado. Esta variabilidad en la respuesta biológica cobra especial relevancia cuando se considera que determinados grupos poblacionales presentan una mayor susceptibilidad a los efectos adversos de estos compuestos. Las diferencias en la vulnerabilidad no se deben únicamente a factores fisiológicos intrínsecos, sino también a patrones de exposición específicos y a la existencia de ventanas críticas del desarrollo, durante las cuales la exposición a EDCs puede tener efectos duraderos sobre la salud metabólica y endocrina.

3.5. Disruptores endocrinos y grupos vulnerables

Los efectos de disruptores endocrinos sobre el sistema endocrino varían según la dosis de exposición y el momento del ciclo vital en que ocurre el contacto; las etapas de crecimiento y desarrollo, como el periodo prenatal, perinatal, postnatal, infancia temprana, segunda infancia, la pubertad y el embarazo, representan etapas críticas de vulnerabilidad, siendo los periodos perinatal y prenatal los más sensibles, ya que la exposición a EDCs durante estas fases puede aumentar el riesgo de desarrollar enfermedades a corto y largo plazo (Bergman et al., 2012; Asenuga y Olagunju, 2023). La evidencia ha vinculado la exposición temprana a EDCs con mayor incidencia de trastornos reproductivos, cánceres hormonodependientes, alteraciones neuroconductuales, del aprendizaje, infecciones, asma y, posiblemente, de obesidad y diabetes mellitus (Bergman et al., 2012; Asenuga y Olagunju, 2023). Asimismo, se ha documentado el impacto de los EDCs en la función tiroidea, especialmente durante el embarazo y la primera infancia, etapa en la que la hormona tiroidea es esencial para el desarrollo y crecimiento del organismo (Bergman et al., 2012; Asenuga y Olagunju, 2023; NIH, 2024).

En adultos, particularmente en mujeres y hombres en edad fértil, la exposición creciente a sustancias químicas en entornos industrializados, los EDCs alteran la síntesis, metabolismo y acción hormonal, lo cual se ha relacionado con el aumento global en el uso de servicios de reproducción asistida, disminución de la fertilidad, así como una mayor incidencia de cáncer de mamá y testicular (Bergman et al., 2012; NIH, 2024).

El marcado incremento de enfermedades no transmisibles a nivel mundial no puede explicarse exclusivamente por factores tradicionales como el sedentarismo, una alimentación inadecuada, el tabaquismo o el consumo de alcohol (Bergman et al., 2012). En la actualidad, se reconoce la influencia ambiental, en particular la exposición crónica a EDCs como factor emergente en la carga global de enfermedades (Bergman et al., 2012). Comprender estos vínculos es esencial para el desarrollo de estrategias preventivas eficaces orientadas a mejorar la salud pública (Bergman et al., 2012).

Dado lo anterior, es fundamental priorizar la protección de grupos vulnerables como niños, adolescentes, embarazadas, personas en edad fértil, adultos mayores, individuos con deficiencias nutricionales y aquellos que viven o trabajan en entornos contaminados. La reducción de la exposición a EDCs es clave para prevenir el deterioro de la salud (Bergman et al., 2012; Asenuga y Olagunju, 2023). En este contexto, la nutrición se perfila como una herramienta prometedora, ya que ciertos componentes dietéticos pueden modular la toxicocinética y toxicodinámica de los EDCs, y reforzar los mecanismos endógenos de defensa frente a los desequilibrios hormonales inducidos por estos compuestos.

3.6. Papel de la nutrición en la mitigación de efectos de las exposiciones ambientales sobre el equilibrio hormonal

La nutrición desempeña un papel crucial en la mitigación de los efectos de las exposiciones ambientales sobre el equilibrio hormonal y la salud en general (Trindade, 2020). Se han identificado tres mecanismos principales mediante los cuales la dieta puede modular la exposición a los EDCs: en primer lugar, mediante la reducción de la ingestión de estos compuestos a través de una selección alimentaria más consciente, así como métodos de producción, manipulación y envasado que minimicen la exposición a estos compuestos; en segundo lugar, a través de modificaciones dietéticas que previenen parcialmente su acumulación en el organismo; y, finalmente, mediante la incorporación de nutrientes esenciales y compuestos bioactivos capaces de contrarrestar los efectos nocivos de los EDCs y las toxinas ambientales (Trindade, 2020; Demirel, 2022).

Desde el enfoque nutricional, es posible implementar estrategias dirigidas a disminuir la ingesta de EDCs; para ello es necesario fomentar la identificación de estos compuestos en los alimentos, conocer su procedencia, cumplir con los principios de una alimentación correcta y mejorar las prácticas de manipulación, preparación y conservación de alimentos (Demirel, 2022). Reconocer la presencia de los EDCs en los productos alimentarios implica comprender que no todos los patrones dietéticos son igualmente beneficiosos, ya que estos compuestos pueden encontrarse de forma natural o como contaminantes (Demirel, 2022).

Un ejemplo notable es la alta presencia de EDCs en alimentos ultraprocesados y en sus envases, los cuales representan una fuente relevante de exposición a compuestos como bisfenoles, ftalatos, pesticidas, compuestos perfluorados y metales pesados (Vindas-Smith et al., 2022). Su acumulación en el organismo puede ser mayor cuando estos productos se consumen con frecuencia o en cantidades que superan las recomendaciones para la población general (Vindas-Smith et al., 2022).

La elección informada de los alimentos también implica considerar su origen; se recomienda priorizar el consumo de productos locales, orgánicos y frescos, limitando en lo posible aquellos altamente procesados; si bien estas prácticas no eliminan completamente la exposición, contribuyen a su reducción en la vida cotidiana (Sessa et al., 2021; Demirel, 2022). Un estudio realizado con 130 niños evaluó el impacto de un servicio de alimentación libre de plásticos durante cinco días a la semana, tras seis meses, se observó una disminución significativa en los niveles urinarios de BPA en el grupo intervenido, mientras que en el grupo control, que no modificó sus hábitos alimentarios, no se presentaron cambios estadísticamente significativos (Sessa et al., 2021).

El mejorar las prácticas de manipulación, preparación y conservación de los alimentos permite reducir la migración de EDCs desde utensilios o envases contaminantes, se recomienda evitar el uso

de plásticos y artículos de higiene que puedan liberar EDCs al estar en contacto con alimentos, especialmente bajo condiciones de calor; en su lugar, se sugiere el empleo de materiales como el acero inoxidable, vidrio o porcelana (Sessa et al., 2021; Demirel, 2022). La migración de EDCs desde plásticos a los alimentos está influenciada por factores como la temperatura, tipo de alimento, duración del contacto y características químicas del envase; sustancias químicas que migran de los envases hechos de cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano y polietileno de baja densidad se han asociado con efectos disruptores endocrinos y metabólicos (Stevens et al., 2024).

Una estrategia clave para reducir la ingesta de EDCs consiste en cuidar la composición de la dieta, siguiendo los principios de una alimentación correcta: adecuada, suficiente, completa, equilibrada, variada e inocua (SSA et al., 2023). Estas características están orientadas a satisfacer las necesidades nutricionales individuales, evitando tanto deficiencias como excesos que podrían incrementar la vulnerabilidad del organismo frente a la exposición a EDCs, especialmente en etapas críticas del desarrollo como el periodo intrauterino y la primera infancia (Demirel, 2022). Una dieta equilibrada, rica en macronutrientes y micronutrientes, es esencial para el funcionamiento del sistema endocrino y para la adecuada producción hormonal. En particular, los lípidos poliinsaturados, como los ácidos grasos omega-3, presentes en alimentos como pescados grasos, nueces y semillas, desempeñan un papel importante en el mantenimiento del equilibrio hormonal y la protección frente al estrés oxidativo. Por su parte, los vegetales crucíferos, aunque ricos en compuestos bioactivos beneficiosos, deben consumirse preferiblemente cocidos, ya que su consumo crudo en grandes cantidades puede interferir con la función tiroidea debido a su contenido de goitrógenos (Itrat, 2021).

La nutrición también puede contribuir a reducir la carga interna de EDCs mediante cambios en la dieta que limitan su acumulación parcial en el organismo, mantener un estado nutricional adecuado y, con el consumo de ciertos compuestos, se facilita la reducción y eliminación de algunos EDCs del organismo (Sargis et al., 2019).

La vulnerabilidad nutricional constituye un factor crítico en la respuesta del organismo a los EDCs; las deficiencias preexistentes en nutrientes esenciales pueden amplificar el daño inducido por estos compuestos, afectando tanto el curso de enfermedades como el riesgo de desarrollar futuras alteraciones endocrinas o metabólicas (Demirel, 2022).

En personas con sobrepeso u obesidad, la exposición a EDCs puede verse amplificada debido a la mayor proporción de tejido adiposo, que actúa como reservorio de estos compuestos por sus propiedades lipofílicas (Rodríguez, 2019; Demirel, 2022). Durante la pérdida de peso, los EDCs almacenados en el tejido adiposo pueden liberarse al torrente sanguíneo, incrementando sus concentraciones séricas y potencialmente exacerbando sus efectos adversos sobre la salud; por esta razón, se recomienda que la pérdida de peso se lleve a cabo de forma gradual, evitando ciclos frecuentes de ganancia y pérdida que favorecen la movilización continua de estos compuestos (Rodríguez, 2019; Demirel, 2022).

La calidad nutricional incide directamente sobre la función hormonal; las dietas inadecuadas o deficientes pueden intensificar los efectos nocivos de los EDCs sobre el sistema endocrino (Trindade, 2020). Por ejemplo, se ha demostrado que la deficiencia del hierro (Fe) aumenta la absorción de Pb, amplificando su toxicidad (Sargis et al., 2019). En un estudio multicéntrico realizado en 396 mujeres embarazadas entre las semanas 13 y 26 de gestación, se observó una correlación negativa significativa entre los niveles de Pb en sangre y parámetros relacionados con el estado de Fe, como la hemoglobina, la capacidad total de fijación de Fe, la ferritina y el Fe sérico (Arshad et al., 2022). El nivel medio de

Pb fue considerablemente mayor en mujeres con anemia ferropénica ($22.12 \pm 1.02 \mu\text{g/dL}$) en comparación con el grupo control ($3.25 \pm 0.407 \mu\text{g/dL}$) y el grupo con deficiencia de hierro ($7.96 \pm 0.502 \mu\text{g/dL}$) (Arshad et al., 2022).

La suplementación nutricional con micronutrientes específicos también puede mitigar los efectos de la exposición a EDCs, especialmente en individuos con deficiencias (Sargis et al., 2019). Por ejemplo, se ha observado que la suplementación materna con ácido fólico puede modular los efectos del BPA. En un estudio experimental en ratones, la suplementación con ácido fólico, sulfato de zinc o una combinación de ambos mejoró significativamente la función testicular y la histoarquitectura en animales expuestos a BPA durante 12 semanas (Mustari et al., 2022). En humanos, un estudio con 178 mujeres sometidas a fertilización *in vitro* reveló que aquellas con ingesta inferior a $400 \mu\text{g/día}$ de folato y niveles altos de BPA en orina presentaban una probabilidad 66 % menor de implantación; en contraste, las mujeres con una ingesta $\geq 400 \mu\text{g/día}$ de folato mostraron una probabilidad 21 % mayor de implantación, incluso con niveles elevados de BPA (Mínguez-Alarcón et al., 2016).

Otro componente dietético relevante en la reducción de la carga corporal de EDCs es la fibra alimentaria, especialmente la fibra fermentable como la pectina, goma konjac, quitosano, salvado de trigo y salvado de arroz; estos tipos de fibra pueden unirse a diferentes EDCs como bifenilos policlorados, dioxinas policloradas, dibenzofuranos policlorados e hidrocarburos policíclicos, facilitando su excreción y reduciendo su biodisponibilidad y acumulación en el organismo (Jin et al., 2017; Sargis et al., 2019). En un estudio realizado en mujeres embarazadas, se observó que una dieta rica en fibra proveniente de verduras, frutas, hongos, arroz, algas marinas, leguminosas y frutos secos se asoció con niveles séricos más bajos de PCBs, tanto en sangre materna como en sangre del cordón umbilical; así mismo, se encontró una asociación negativa con otros nutrientes, como el manganeso y el ácido pantoténico, lo que sugiere un papel protector adicional de estos elementos en el contexto de la exposición a EDCs (Jin et al., 2017).

Finalmente, la nutrición puede mitigar los efectos nocivos de los EDCs a través del aporte de nutrientes esenciales y compuestos bioactivos capaces de contrarrestar el estrés oxidativo, la inflamación y otros mecanismos tóxicos inducidos por estas sustancias. Una dieta saludable contribuye a reducir la toxicidad de los EDCs, al potenciar los procesos de desintoxicación y disminuir las respuestas inflamatorias (Hoffman y Hennig, 2017).

El consumo adecuado de frutas, verduras, oleaginosas, pescados azules y leguminosas provee al organismo de compuestos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias; estos compuestos pueden inhibir vías de estrés oxidativo e inflamación que suelen ser activadas por los EDCs para inducir daño tisular y alteraciones metabólicas (Hoffman y Hennig, 2017; Demirel, 2022). Entre los antioxidantes dietéticos con efectos protectores se encuentran la vitamina C, vitamina E, betacaroteno y flavonoides, los cuales han mostrado eficacia en la neutralización del estrés oxidativo inducido por pesticidas (Sajad et al., 2024).

Compuestos específicos como la coenzima Q10 han mostrado beneficios en modelos animales, al reducir la generación de radicales libres y mejorar la función mitocondrial en ratas expuestas a organofosforados como diclorvos y mevinfos, la coenzima Q10 mostró una actividad hepatoprotectora significativa (Mantle y Hargreaves, 2018). Así mismo, los ácidos grasos omega-3, particularmente el ácido docosahexaenoico (DHA), poseen propiedades antiinflamatorias que protegen frente al daño oxidativo inducido por pesticidas (Avci et al., 2017). En un estudio con ratas *Sprague-Dawley* expuestas a clorpirifos, la suplementación con DHA redujo la toxicidad de manera

dosis-dependiente, aumentando las enzimas antioxidantes y disminuyendo los efectos prooxidantes del pesticida (Avci et al., 2017).

Nutrientes con actividad fitoquímica, como los polifenoles, también desempeñan un papel importante en la modulación hormonal y la prevención de enfermedades relacionadas con la exposición a EDCs (Hoffman y Hennig, 2017). El resveratrol, presente en las uvas, bayas y otros vegetales, ha mostrado capacidad para contrarrestar las alteraciones en la homeostasis de la glucosa inducidas por los PCBs en adipocitos, ofreciendo un efecto protector frente al desarrollo de diabetes tipo 2 (Hoffman y Hennig, 2017). Por su parte, el galato de epigallocatequina (EGCG, *por sus siglas en inglés*), un compuesto fenólico del té verde, ha demostrado atenuar la inflamación cardiovascular y la toxicidad asociada a metales pesados (Hoffman y Hennig, 2017). En cultivos de células endoteliales humanas, el EGCG redujo la respuesta inflamatoria inducida por el PCB 126, disminuyendo la expresión de mediadores inflamatorios como interleucina 6, proteína C reactiva, ICAM-1 e IL-1 α/β mediante mecanismos epigenéticos (Liu et al., 2016).

En conjunto, una nutrición saludable no solo contribuye al fortalecimiento y mantenimiento funcional del sistema endocrino, sino que también representa una estrategia preventiva frente a los efectos tóxicos derivados de la exposición a contaminantes ambientales. Así, el enfoque nutricional adquiere un papel relevante no sólo en la promoción de la salud individual, sino también en el diseño de intervenciones de salud pública orientadas a reducir la carga de enfermedad asociada a la exposición crónica a EDCs.

4. Conclusiones

Los disruptores endocrinos son compuestos capaces de interferir con los mecanismos hormonales del organismo, afectando la acción hormonal mediante diversas vías, como la unión a receptores hormonales, la alteración de la expresión génica y la modificación en la síntesis hormonal, incluso a concentraciones muy bajas. Estas disrupciones se han asociado con un aumento en la incidencia de trastornos reproductivos, ciertos tipos de cáncer, enfermedades neurológicas y alteraciones metabólicas. Entre las principales fuentes de exposición a los EDCs se encuentran los alimentos, ya sea por la presencia natural de algunos compuestos o por contaminación química durante las distintas etapas del proceso productivo. En este contexto, una alimentación adecuada podría desempeñar un papel protector frente a los efectos nocivos de estos compuestos, especialmente en poblaciones vulnerables como niños, adolescentes, mujeres embarazadas, personas en edad fértil, adultos mayores, individuos con estado nutricional comprometido y quienes están expuestos a entornos contaminados. Esto se debe a las posibles interacciones entre los nutrientes y las sustancias tóxicas. Por lo tanto, se propone la inclusión de herramientas como encuestas de frecuencia alimentaria, que permitan estimar la exposición a EDCs a través de la dieta. Esta información debería formar parte de la historia clínica aplicada en investigación en salud, con el objetivo de generar datos sólidos que respalden la toma de decisiones en salud pública.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, B.G.B.P.; investigación, A.C.E., B.E.H.Y., D.C.G.P., A.K.G.Q., G.F.R., M.G.A., R.R.L., B.G.B.P.; redacción del borrador original, A.C.E., B.E.H.Y., D.C.G.P., A.K.G.Q., G.F.R., M.G.A., R.R.L., B.G.B.P.; redacción-revisión y edición, R.R.L., B.G.B.P.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no tienen conflicto de interés con la publicación de los resultados de la revisión.

5. Referencias

- Ahn, C., & Jeung, E. B. (2023). Endocrine-Disrupting Chemicals and Disease Endpoints. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5342. <https://doi.org/10.3390/ijms24065342>
- Al'Absi, M., DeAngelis, B., Nakajima, M., Hatsukami, D., & Allen, S. (2021). Early life adversity and appetite hormones: The effects of smoking status, nicotine withdrawal, and relapse on ghrelin and peptide YY during smoking cessation. *Addictive behaviors*, 118: 106866. <https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2021.106866>
- Al-Chalabi, M., Bass, N., & Alsalman, I. (2023). Physiology, prolactin. In: StatPearls. National Library of Medicine. (pp 391-392). *StatPearls Publishing*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507829/>
- Álvarez-Crespo, M., González-Matías, L. C., Gil-Lozano, M., Fontans-Paz, S., Romani-Pérez, M., Vigo Gago, E., & Mallo-Ferrer, F. (2009). Las hormonas gastrointestinales en el control de la ingesta de alimentos. *Endocrinología y Nutrición*, 56(6): 317-330. [https://doi.org/10.1016/S1575-0922\(09\)71946-1](https://doi.org/10.1016/S1575-0922(09)71946-1)
- Álvarez-González, M. Y., Sánchez-Islas, E., Mucio-Ramírez, S., de Gortari, P., Amaya, M. I., Kodavanti, P. R. S., & León-Olea, M. (2020). Perinatal exposure to octabromodiphenyl ether mixture, DE-79, alters the vasopressinergic system in adult rats. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 391: 114914. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2020.114914>
- Arshad, S., Arif, A., & Wattoo, J. I. (2022). Response of Iron Deficiency Markers to Blood Lead Levels and Synergistic Outcomes at Prenatal Stage. *Dose-response*, 20(2): 15593258221101744. <https://doi.org/10.1177/15593258221101744>
- Asenuga, E. R., & Olagunju, A. S. (2023). Exposure and associated health risk of endocrine disruption compounds. *African Journal of Health, Safety and Environment*, 4(1): 57–66. <https://doi.org/10.52417/ajhse.v4i1.332>
- Assenza, M. R., Gaggi, G., di Credico, A., Ghinassi, B., & Barbagallo, F. (2025). The Effect of Endocrine Disruptors on the Cardiovascular System: does sex matter? *Environmental research*, 277: 121612. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121612>

- Avci, B., Bilge, S. S., Arslan, G., Alici, O., Darakci, O., Baratzada, T., Ciftcioglu, E., Yardan, T., & Bozkurt, A. (2017). Protective effects of dietary omega-3 fatty acid supplementation on organophosphate poisoning. *Toxicology and Industrial Health*, 34(2): 69–82. <https://doi.org/10.1177/0748233717737646>
- Ayman, J., Palotai, M., Dochnal, R., & Bagosi, Z. (2023). Ghrelin Amplifies the Nicotine-Induced Release of Dopamine in the Bed Nucleus of Stria Terminalis (BNST). *Biomedicines*, 11(9): 2456 <https://doi.org/10.3390/biomedicines11092456>
- Azaretzky, M., Ponzo, O. J., Viale, M. L., Fernandez, G. I., Sedlinsky, C. E., Lasaga, M., Scaglia, H. E., Lewitan, G. E., Pozniak, S., & Leiderman, S. (2018). Disruptores endocrinos: Guía de reconocimiento, acciones y recomendaciones para el manejo médico. *Revista argentina de endocrinología y metabolismo*, 55(2): 21-30. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30342018000200021&lng=es&tlng=es.
- Bergman, A., Heindel, J. J., Jobling, S., Kidd, K. A., & Zoeller, R. T. (Eds.). (2012). State of the science of endocrine disrupting chemicals 2012. Inter-organization Programme for the Sound Management of Chemicals. 260 pp. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. <https://www.who.int/publications/i/item/state-of-the-science-of-endocrine-disrupting-chemicals>
- Bouwman, H., Kylin, H., Sereda, B., & Bornman, R. (2012). High levels of DDT in breast milk: intake, risk, lactation duration, and involvement of gender. *Environmental Pollution*, 170: 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.06.009>
- Briceño-Rodríguez, L. L., Céspedes-Salazar, C., & Forero-Ronderos, C. (2024). Disruptores endocrinos y enfermedades endocrinológicas en niños y adolescentes. *Revista Colombiana de Endocrinología, Diabetes y Metabolismo*, 11(2): 186-199. <https://doi.org/10.53853/encr.11.2.872>
- Calzada-León, R., Altamirano-Bustamante, N., & Ruiz-Reyes, M. L. (2008). Reguladores neuroendocrinos y gastrointestinales del apetito y la saciedad. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 65(6): 468-487. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-11462008000600007&lng=es&tlng=es
- Campbell, M., & Jialal, I. (2022). Fisiología, hormonas endocrinas. In: StatPearls. *Stat Pearls Publishing*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538498/>
- Carranza-Quispe, L. E. (2016). Fisiología del apetito y el hambre. *Enfermería Investiga*, 1(3): 117-124. <https://revistas.uta.edu.ec/erevista/index.php/enfi/article/view/754>
- Chen, Y., Xiang, Q., Wang, N., Zhang, W., Zhu, C., Wang, Y., Wan, H., Cheng, J., Zhang, K., Cai, Y., & Lu, Y. (2022). Are ethnic differences, urinary iodine status, lead and cadmium exposure associated with thyroid autoimmunity and hypothyroid status? A cross-sectional study. *BMJ open*, 12(2): e056909. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-056909>
- Chen, Y., Zhou, C., Bian, Y., Fu, F., Zhu, B., Zhao, X., Zhang, M., Zhou, C., Yao, S., Zhang, Z., Luo, H., Ge, Y., Wu, C., & Ruan, H. (2023). Cadmium exposure promotes thyroid pyroptosis and endocrine dysfunction by inhibiting Nrf2/Keap1 signaling. *Ecotoxicology and environmental safety*, 249: 114376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114376>
- Criswell, R., Crawford, K. A., Bucinca, H., & Romano, M. E. (2020). Endocrine-disrupting chemicals and breastfeeding duration: a review. *Current opinion in endocrinology, diabetes, and obesity*, 27(6): 388–395. <https://doi.org/10.1097/MED.0000000000000577>

- Dagar, M., Kumari, P., Mirza, A. M. W., Singh, S., Ain, N. U., Munir, Z., Javed, T., Virk, M. F. I., Javed, S., Qizilbash, F. H., Kc, A., Ekhtor, C., & Bellegarde, S. B. (2023). The Hidden Threat: Endocrine Disruptors and Their Impact on Insulin Resistance. *Cureus*, 15(10), e47282. <https://doi.org/10.7759/cureus.47282>
- Demeneix, B., & Slama, R. (2019). Endocrine Disruptors: from Scientific Evidence to Human Health Protection. Think Tank European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2019\)608866](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2019)608866)
- Demir, A., Aydın, A., & Büyükgebiz, A. (2025). Thematic Review of Endocrine Disruptors and Their Role in Shaping Pubertal Timing. *Children (Basel, Switzerland)*, 12(1): 93. <https://doi.org/10.3390/children12010093>
- Demirel, Z. B. (2022). Strategies and Recommendations for Reducing Exposure to Endocrine Disruptors: Nutrition-Based Consumer Strategies and Recommendations. *Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları*, (s. 11-34). <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-04-7.ch16>
- De-Paula, L. C. P., & Alves, C. (2024). Food packaging and endocrine disruptors. *Jornal de pediatria*, 100 (Suppl 1): S40–S47. <https://doi.org/10.1016/j.jpmed.2023.09.010>
- Derakhshan, A., Shu, H., Broeren, M. A. C., Lindh, C. H., Peeters, R. P., Kortenkamp, A., Demeneix, B., Bornehag, C. G., & Korevaar, T. I. M. (2021). Association of phthalate exposure with thyroid function during pregnancy. *Environment International*, 157: 106795. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106795>
- Deschaine, S. L., Farokhnia, M., Gregory-Flores, A., Zallar, L. J., You, Z. B., Sun, H., Harvey, D. M., Marchette, R. C. N., Tunstall, B. J., Mani, B. K., Moose, J. E., Lee, M. R., Gardner, E., Akhlaghi, F., Roberto, M., Hougland, J. L., Zigman, J. M., Koob, G. F., Vendruscolo, L. F., & Leggio, L. (2022). A closer look at alcohol-induced changes in the ghrelin system: novel insights from preclinical and clinical data. *Addiction biology*, 27(1): e13033. <https://doi.org/10.1111/adb.13033>
- Díaz-Vallejo, J., Barraza-Villarreal, A., Yáñez-Estrada, L., & Hernández-Cadena, L. (2021). Plaguicidas en alimentos: riesgo a la salud y marco regulatorio en Veracruz, México. *Salud Pública de México*, 63(4), 486-497. <https://doi.org/10.21149/12297>
- Dickerson, S. M., & Gore, A. C. (2007). Estrogenic environmental endocrine-disrupting chemical effects on reproductive neuroendocrine function and dysfunction across the life cycle. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 8: 143-159. <https://www.doi.org/10.1007/S11154-007-9048-Y>
- Dobolyi, A., Oláh, S., Keller, D., Kumari, R., Fazekas, E. A., Csikós, V., Renner, É., & Cservenák, M. (2020). Secretion and function of pituitary prolactin in evolutionary perspective. *Frontiers in Neuroscience*, 14: 621. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00621>
- Engelmann, M., Landgraf, R., & Wotjak, C. T. (2004). The hypothalamic-neurohypophysial system regulates the hypothalamic-pituitary-adrenal axis under stress: an old concept revisited. *Frontiers in Neuroendocrinology*, 25(3–4): 132–149. <https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2004.09.001>
- Esteve-Ràfols, M. (2014). Adipose tissue: cell heterogeneity and functional diversity. *Endocrinologia y Nutricion*, 61(2): 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.endonu.2013.03.011>
- Gao, H., Chen, D., & Zang, M. (2021). Association between phthalate exposure and insulin resistance: a systematic review and meta-analysis update. *Environmental science and pollution research international*, 28(40): 55967–55980. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16252-9>

- García-Mayor, R. V., Larrañaga Vidal, A., Docet Caamaño, M. F., & Lafuente Giménez, A. (2012). Disruptores endocrinos y obesidad: obesógenos. *Endocrinología y nutrición: organo de la Sociedad Española de Endocrinología y Nutrición*, 59(4), 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.endonu.2011.11.008>
- Ge, X., Weis, K., & Raetzman, L. (2024). Impact of real-life environmental exposures on reproduction: Impact of developmental exposures to endocrine-disrupting chemicals on pituitary gland reproductive function. *Reproduction*, 168(6): e240072. <https://doi.org/10.1530/REP-24-0072>
- Gore, A. C. (2001). Environmental toxicant effects on neuroendocrine function. *Endocrine*, 14: 235–246. <https://www.doi.org/10.1385/ENDO:14:2:235>
- Gomez, A. L., Altamirano, G. A., Leturia, J., Bosquiazzo, V. L., Muñoz-de-Toro, M., & Kass, L. (2019). Male mammary gland development and methylation status of estrogen receptor alpha in Wistar rats are modified by the developmental exposure to a glyphosate-based herbicide. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 481: 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2018.11.005>
- González-Castell, L. D., Unar-Munguía, M., Bonvecchio-Arenas, A., Rivera-Pasquel, M., Lozada-Tequeanes, A. L., Ramírez-Silva, C. I., Álvarez-Peña, I. J., Cobo-Armijo, F., & Rivera-Dommarco, J. A. (2024). Lactancia materna. *Salud Pública de México*, 66(4): 498–508. <https://doi.org/10.21149/15898>
- González-Hita, M. E., Ambrosio-Macías, K. G., & Sánchez-Enríquez, S. (2006). Regulación neuroendocrina del hambre, la saciedad y mantenimiento del balance energético. *Investigación en Salud*, 8(3): 191–200. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14280309>
- Ghosh, A., Tripathy, A., & Ghosh, D. (2022). Impact of endocrine disrupting chemicals (EDCs) on reproductive health of human. *Proceedings of the Zoological Society*, 75: 16–30. <https://doi.org/10.1007/s12595-021-00412-3>
- Guarnotta, V., Amodei, R., Frasca, F., Aversa, A., & Giordano, C. (2022). Impact of Chemical Endocrine Disruptors and Hormone Modulators on the Endocrine System. *International journal of molecular sciences*, 23(10): 5710. <https://doi.org/10.3390/ijms23105710>
- Guo Z., Guo H., & Xia Y. (2011). Effects on endocrine system of female rats exposed to chronic arsenic. *Wei sheng yan jiu [Journal of hygiene research]*, 40(2): 178–179. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21560304/>
- Gupta, P., Mahapatra, A., Suman, A., & Singh, R. K. (2021). Effect of endocrine disrupting chemicals on HPG axis: a reproductive endocrine homeostasis. *IntechOpen*. <https://www.doi.org/10.5772/INTECHOPEN.96330>
- Hall, J.E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*, 14th Edition. Elsevier.
- Hannon, P. R., Peretz, J., & Flaws, J. A. (2014). Daily exposure to Di(2-ethylhexyl) phthalate alters estrous cyclicity and accelerates primordial follicle recruitment potentially via dysregulation of the phosphatidylinositol 3-kinase signaling pathway in adult mice. *Biology of Reproduction*, 90(6): 136. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.114.119032>
- Hernández-Gúzman, A., Bazán-Pérez, A., Ortiz-Reyes, R. A., Maldonado-García, J. L., & Terrones-Lozano, A. (2022). Perspectiva neuroinmunoendocrina de la lactancia materna: prolactina, más que una hormona lactógena. *Revista mexicana de endocrinología, metabolismo y nutrición*, 9(2): 78–84. <http://dx.doi.org/10.24875/RME.21000019>

- Heshmati, M. H. (2020). Human Health Consequences of Endocrine-Disrupting Chemicals. *IntechOpen*: 1-16. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94955>
- Hoffman, J. B., & Hennig, B. (2017). Protective influence of healthful nutrition on mechanisms of environmental pollutant toxicity and disease risks. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1398(1): 99–107. <https://doi.org/10.1111/nyas.13365>
- Hugo, E. R., Brandebourg, T. D., Woo, J. G., Loftus, J., Alexander, J. W., & Ben-Jonathan, N. (2008). Bisphenol A at environmentally relevant doses inhibits adiponectin release from human adipose tissue explants and adipocytes. *Environmental health perspectives*, 116(12): 1642–1647. <https://doi.org/10.1289/ehp.11537>
- Itrat, N. (2021). Hormone Harmony in metabolic disorders. In Hamid Akash, M. S., Rehman, K., & Hashmi, M. Z. (Eds.) *Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies* (pp. 393–408). *Springer International Publishing*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45923-9>
- Jin, W., Otake, M., Eguchi, A., Sakurai, K., Nakaoka, H., Watanabe, M., Todaka, E., & Mori, C. (2017). Dietary Habits and Cooking Methods Could Reduce Avoidable Exposure to PCBs in Maternal and Cord Sera. *Scientific reports*, 7: 17357. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17656-9>
- Juan-García, A., Gallego, C., & Font, G. (2015). Toxicidad del Bisfenol A: Revisión. *Revista de Toxicología*, 32(2): 144-160. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91942717014>
- Jumes, J. J., Jaques, H. S., Dalla Vecchia, M. F., Ferreira, M. O., Orrutía, J. F. G., Machado, M. G., Mezoni, M. F., Silva, R. G. S. D., Almeida, R. F., Rech, D., Kawassaki, A. C. B., & Panis, C. (2024). Occupational exposure to pesticides deregulates systemic cortisol levels in women with breast cancer and correlates with poor prognosis features. *Brazilian journal of medical and biological research = Revista brasileira de pesquisas medicas e biologicas*, 57: e13060. <https://doi.org/10.1590/1414-431X2023e13060>
- Kongtip, P., Nankongnab, N., Kallayanatham, N., Pengpumkiat, S., Gore, R., Pundee, R., Konthonbut, P., & Woskie, S. R. (2021). Disruption of the Diurnal Cortisol Hormone Pattern by Pesticide Use in a Longitudinal Study of Farmers in Thailand. *Annals of Work Exposures and Health*, 65(4): 406–417. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa124>
- Koopmann, A., Bez, J., Lemenager, T., Hermann, D., Dinter, C., Reinhard, I., Hoffmann, H., Wiedemann, K., Winterer, G., & Kiefer, F. (2015). Effects of Cigarette Smoking on Plasma Concentration of the Appetite-Regulating Peptide Ghrelin. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 66(2-3): 155–161. <https://doi.org/10.1159/000381834>
- Kordas, K., Lönnerdal, B., & Stoltzfus, R. J. (2007). Interactions between nutrition and environmental exposures: effects on health outcomes in women and children. *The Journal of Nutrition*, 137(12): 2794–2797. <https://doi.org/10.1093/jn/137.12.2794>
- Kortenkamp, A. (2011). Are cadmium and other heavy metal compounds acting as endocrine disrupters? In Sigel, A. et al. (Eds.) *Metal Ions in Toxicology: Effects, Interactions, Interdependencies* (pp. 305–317). RSC Publishing. <https://doi.org/10.1039/9781849732116-00305>
- Kumar, M., Sarma, D. K., Shubham, S., Kumawat, M., Verma, V., Prakash, A., & Tiwari, R. (2020). Environmental Endocrine-Disrupting Chemical Exposure: Role in Non-Communicable Diseases. *Frontiers in public health*, 8: 553850. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.553850>

- Leggio, L., Ferrulli, A., Cardone, S., Nesci, A., Miceli, A., Malandrino, N., Capristo, E., Canestrelli, B., Monteleone, P., Kenna, G. A., Swift, R. M., & Addolorato, G. (2012). Ghrelin system in alcohol-dependent subjects: role of plasma ghrelin levels in alcohol drinking and craving. *Addiction biology*, 17(2): 452–464. <https://doi.org/10.1111/j.1369-1600.2010.00308.x>
- León-Olea, M., Alvarez-Gonzalez, M. Y., Mucio-Ramirez, S., Sánchez-Jaramillo, E., & Sánchez-Islas, E. (2023). Chapter Six - Neuroendocrine effects of brominated flame retardants, focused on polybrominated diphenyl ethers. In: Prasada Rao S. Kodavanti, Michael Aschner, Lucio G. Costa (Eds.), *Neurotoxicity of Halogenated Organic Compounds. Advances in Neurotoxicology*, 10: 209–277. <https://doi.org/10.1016/bs.ant.2023.08.001>
- Liang, Y., Zhan, J., Liu, D., Luo, M., Han, J., Liu, X., Liu, C., Cheng, Z., Zhou, Z., & Wang, P. (2019). Organophosphorus pesticide chlorpyrifos intake promotes obesity and insulin resistance through impacting gut and gut microbiota. *Microbiome*, 7: 19. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0635-4>
- Li, Z., & Robaire, B. (2025). Effects of Endocrine-Disrupting Chemicals on Adrenal Function. *Endocrinology*, 166(4): bqaf045. <https://doi.org/10.1210/endocr/bqaf045>
- Liu, D., Perkins, J. T., & Hennig, B. (2016). EGCG prevents PCB-126-induced endothelial cell inflammation via epigenetic modifications of NF- κ B target genes in human endothelial cells. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 28: 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2015.10.003>
- Liu, D., Shi, Q., Liu, C., Sun, Q., & Zeng, X. (2023). Effects of Endocrine-Disrupting Heavy Metals on Human Health. *Toxics*, 11(4): 322. <https://doi.org/10.3390/toxics11040322>
- Li, X., Wang, W., Hou, Y., Li, G., Yi, H., Cui, S., Zhang, J., He, X., Zhao, H., Yang, Z., Qiu, Y., Liu, Z., & Xie, J. (2023). Arsenic interferes with spermatogenesis involving Rictor/mTORC2-mediated blood-testis barrier disruption in mice. *Ecotoxicology and environmental safety*, 257: 114914. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114914>
- Maidana, P., Bruno, O. D., & Mesch, V. (2013). Medición de cortisol y sus fracciones: Una puesta al día. *Medicina (Buenos Aires)*, 73(6): 579–584. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0025-76802013000800016&script=sci_arttext
- Mantle, D., & Hargreaves, I. P. (2018). Organophosphate poisoning and coenzyme Q10: an overview. *British Journal of Neuroscience Nursing*, 14(5): 206–214. <https://doi.org/10.12968/bjnn.2018.14.5.206>
- McGaha A. L. (2024). Environment and Health: Endocrine-Disrupting Chemicals. *FP essentials*, 545: 23–30. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39412506/>
- Marconetto, A., Babini, A., Ñáñez, M., Moreno, L., Rosato, O., & Fux, Otta, C. (2022). Principales disruptores endocrinos vinculados con salud reproductiva femenina: bases biológicas de su asociación. *Medicina (B.Aires)*, 82(3): 428–438. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0025-76802022000500428&lng=e
- Marques, P., De-Sousa-Lages, A., Skorupskaite, K., Rozario, K., S., Anderson, R. A., & George, J. T. (2024). Fisiología de la secreción de GnRH y gonadotropinas. *Endotext South Dartmouth*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279070/>
- Mínguez-Alarcón, L., Gaskins, A. J., Chiu, Y. H., Souter, I., Williams, P. L., Calafat, A. M., Hauser, R., Chavarro, J. E., & EARTH Study team (2016). Dietary folate intake and modification of the association of urinary bisphenol A concentrations with in vitro fertilization outcomes among

- women from a fertility clinic. *Reproductive toxicology* (Elmsford, N.Y.), 65: 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2016.07.012>
- Mínguez-Alarcón, L., & Gaskins, A. J. (2017). Female exposure to endocrine disrupting chemicals and fecundity: a review. *Current Opinion in Obstetrics & Gynecology*, 29(4): 202–211. <https://doi.org/10.1097/gco.0000000000000373>
- Mora-Vargas, E. V., & Loera-Serna, S. (2024). Disruptores endocrinos: Sustancias ocultas en la vida diaria que afectan el equilibrio hormonal. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 93: e5042. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2024935042>
- Mosca, A., Manco, M., Braghini, M. R., Cianfarani, S., Maggiore, G., Alisi, A., & Vania, A. (2024). Environment, Endocrine Disruptors, and Fatty Liver Disease Associated with Metabolic Dysfunction (MASLD). *Metabolites*, 14(1): 71. <https://doi.org/10.3390/metabo14010071>
- Mustari, A., Alam, M., Miah, M. A., Nooruzzaman, M., Sujan, K. M., & Chowdhury, E. H. (2022). Retrieval action of zinc and folic acid for the restoration of normal reproductive function in bisphenol-A exposed male albino mice. *Veterinární medicína - Czech*, 67(9): 479–486. <https://doi.org/10.17221/13/2022-VETMED>
- Neblett, M. F., Curtis, S. W., Gerkowicz, S. A., Spencer, J. B., Terrell, M. L., Jiang, V. S., Marder, M. E., Barr, D. B., Marcus, M., & Smith, A. K. (2020). Examining reproductive health outcomes in females exposed to polychlorinated biphenyl and polybrominated biphenyl. *Scientific Reports*, 10: 3314. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60234-9>
- NIH. (2024). Endocrine disruptors. *National Institute of Environmental Health Sciences*. <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/endocrine>
- O'Byrne, N. A., Yuen, F., Butt, W. Z., & Liu, P. Y. (2021). Sleep and circadian regulation of cortisol: A short review. *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research*, 18: 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.coemr.2021.03.011>
- Özen, S., & Darcan, Ş. (2011). Effects of environmental endocrine disruptors on pubertal development. *Journal of clinical research in pediatric endocrinology*, 3(1): 1–6. <https://doi.org/10.4274/jcrpe.v3i1.01>
- Özkan-Kotiloğlu, S., Kaya-Akyüzlü, D., Güven, E., Doğan, Ö., Ağtaş-Ertan, E., & Özgür-İlhan, İ. (2024). A case control study investigating the methylation levels of *GHRL* and *GHSR* genes in alcohol use disorder. *Molecular biology reports*, 51(1): 663. <https://doi.org/10.1007/s11033-024-09585-4>
- Paramasivam, A., Murugan, R., Jeraud, M., Dakkumadugula, A., Periyasamy, R., & Arjunan, S. (2024). Additives in Processed Foods as a Potential Source of Endocrine-Disrupting Chemicals: A Review. *Journal of xenobiotics*, 14(4): 1697–1710. <https://doi.org/10.3390/jox14040090>
- Patisaul, H. B. (2017). Endocrine Disruption of Vasopressin Systems and Related Behaviors. *Frontiers in endocrinology*, 8: 134. <https://doi.org/10.3389/fendo.2017.00134>
- Peivasteh-Roudsari, L., Barzegar-Bafrouei, R., Sharifi, K. A., Azimisalim, S., Karami, M., Abedinzadeh, S., Asadinezhad, S., Tajdar-Oranj, B., Mahdavi, V., Alizadeh, A. M., Sadighara, P., Ferrante, M., Conti, G. O., Aliyeva, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2023). Origin, dietary exposure, and toxicity of endocrine-disrupting food chemical contaminants: A comprehensive review. *Heliyon*, 9(7): e18140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18140>

- Pérez-Bermejo, M., Barrezueta-Aguilar, C., Pérez-Murillo, J., Ventura, I., Legidos-García, M. E., Tomás-Aguirre, F., Tejeda-Adell, M., Martínez-Peris, M., Marí-Beltrán, B., & Murillo-Llorente, M. T. (2024). Impact of Endocrine Disrupting Pesticide Use on Obesity: A Systematic Review. *Biomedicines*, 12(12): 2677. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12122677>
- Pérez, M. (2019). Capítulo 73: Fisiología de la prolactina. In Fernández-Tresguerres, J. A. et al. (Eds.) *Fisiología humana*, 5e. Access Medicine, Mc Graw Hill. <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=2987§ionid=253665017>
- Pecori-Giraldi, F., Ferraù, F., Ragonese, M., & Cannavò, S. (2024). Endocrine disruptors, aryl hydrocarbon receptor and cortisol secretion. *Journal of Endocrinological Investigation*, 47: 2407–2419. <https://doi.org/10.1007/s40618-024-02371-w>
- Peluso, T., Nittoli, V., Reale, C., Porreca, I., Russo, F., Roberto, L., Giacco, A., Silvestri, E., Mallardo, M., De Felice, M., & Ambrosino, C. (2023). Chronic Exposure to Chlorpyrifos Damages Thyroid Activity and Imbalances Hepatic Thyroid Hormones Signaling and Glucose Metabolism: Dependency of T3-FOXO1 Axis by Hyperglycemia. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11): 9582. <https://doi.org/10.3390/ijms24119582>
- Plunk, E. C., & Richards, S. M. (2020). Endocrine-disrupting air pollutants and their effects on the hypothalamus-pituitary-gonadal axis. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(23): 9191. <https://doi.org/10.3390/ijms21239191>
- Pombo-Arias, M., Castro-Feijóo, L., Barreiro-Conde, J., & Cabanas-Rodríguez, P. (2020). Una revisión sobre los disruptores endocrinos y su posible impacto sobre la salud de los humanos. *Rev Esp Endocrinol Pediatr*, 11(2): 33-53. [10.3266/RevEspEndocrinolPediatr.pre2020](https://doi.org/10.3266/RevEspEndocrinolPediatr.pre2020)
- Potretzke, S., Lemieux, A., Nakajima, M., & al'Absi, M. (2022). Circulating ghrelin changes as a biomarker of the stress response and craving in abstinent smokers. *Pharmacology, biochemistry, and behavior*, 218: 173423. <https://doi.org/10.1016/j.pbb.2022.173423>
- Pötl, B., Kürzinger, L., Stopper, H., Fassnacht, M., Kurlbaum, M., & Dischinger, U. (2024). Endocrine disruptors: Focus on the adrenal cortex. *Hormone and Metabolic Research*, 56(01): 78–90. <https://doi.org/10.1055/a-2198-9307>
- Puche-Juarez, M., Toledano, J. M., Moreno-Fernandez, J., Gálvez-Ontiveros, Y., Rivas, A., Diaz-Castro, J., & Ochoa, J. J. (2023). The Role of Endocrine Disrupting Chemicals in Gestation and Pregnancy Outcomes. *Nutrients*, 15(21): 4657. <https://doi.org/10.3390/nu15214657>
- Ralevski, E., Horvath, T. L., Shanabrough, M., Newcomb, J., Pisani, E., & Petrakis, I. (2023). Ghrelin Predicts Stimulant and Sedative Effects of Alcohol in Heavy Drinkers. *Alcohol and alcoholism (Oxford, Oxfordshire)*, 58(1): 100–106. <https://doi.org/10.1093/alcalc/agac058>
- Rahman, M. S., Kwon, W.-S., Karmakar, P. C., Yoon, S.-J., Ryu, B.-Y., & Pang, M.-G. (2017). Gestational exposure to bisphenol A affects the function and proteome profile of F1 spermatozoa in adult mice. *Environmental Health Perspectives*, 125(2): 238–245. <https://doi.org/10.1289/ehp378>
- Rang, H. P., Dale M. M., Ritter, J. M., Flower, R. J., & Henderson, G. (2016). Obesity. In *Rang and Dale Pharmacology* (pp. 393-401). Elsevier.
- Rannaud-Bartaire, P. (2022). Perturbateurs endocriniens et origine environnementale des maladies: intégrer ces données pour un nouveau modèle d'accompagnement des patients vers la santé environnementale [Endocrine disruptors and environmental origins of diseases: Integrating data

- for a new model of environmental health patient support]. *Recherche en soins infirmiers*, 149(2): 7–18. <https://doi.org/10.3917/rsi.149.0007>
- Reilly, M. P., Kunkel, M. N., Thompson, L. M., Zentay, A., Weeks, C. D., Crews, D., Cormack, L. K., & Gore, A. C. (2021). Effects of endocrine-disrupting chemicals on hypothalamic oxytocin and vasopressin systems. *Journal of Experimental Zoology. Part A, Ecological and Integrative Physiology*, 337(1): 75–87. <https://doi.org/10.1002/jez.2475>
- Rhee, S. S., & Pearce, E. N. (2011). Sistema endocrino y corazón: una revisión. *Revista Española de Cardiología*, 64(3): 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2010.10.015>
- Rodríguez, P. A. (2019). Relación entre obesidad y disruptores endocrinos. *NPunto*, 2(18): A932. <https://www.npunto.es/revista/18/relacion-entre-obesidad-y-disruptores-endocrinos>
- Rodríguez-Fernández, J. M., García-Acero, M., & Franco, P. (2013). Neurobiología del Estrés Agudo y Crónico: Su Efecto en el Eje Hipotálamo-Hipófisis-Adrenal y la Memoria. *Universitas. Medica*, 54(4): 472–494. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.umed54-4.neac>
- Sajad, M., Shabir, S., Singh, S. K., Bhardwaj, R., Alsanie, W. F., Alamri, A. S., Alhomrani, M., Alsharif, A., Vamanu, E., & Singh, M. P. (2024). Role of nutraceutical against exposure to pesticide residues: power of bioactive compounds. *Frontiers in Nutrition*, 11: 1342881. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1342881>
- Santiago-Peña, L. F. (2020). Fisiología de la glándula tiroides. Disfunción y parámetros funcionales de laboratorio en patología de tiroides. *ORL*, 11(3): 253–257. <https://doi.org/10.14201/orl.21514>
- Sargis, R. M., Heindel, J. J., & Padmanabhan, V. (2019). Interventions to Address Environmental Metabolism-Disrupting Chemicals: Changing the Narrative to Empower Action to Restore Metabolic Health. *Frontiers in Endocrinology*, 10: 33. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00033>
- Sarzo, B., Soler-Blasco, R., Lopez-Espinosa, M.-J., Lozano, M., Riutort-Mayol, G., Beneito, A., Murcia, M., Iriarte, G., Ballester, F., & Llop, S. (2022). Pre and postnatal exposure to mercury and sexual development in 9-year-old children in Spain: The role of brain-derived neurotrophic factor. *Environmental Health Perspectives*, 2022(1). <https://doi.org/10.1289/isee.2022.p-0423>
- Sessa, F., Polito, R., Monda, V., Scarinci, A., Salerno, M., Carotenuto, M., Cibelli, G., Valenzano, A., Campanozzi, A., Mollica, M. P., Monda, M., & Messina, G. (2021). Effects of a Plastic-Free Lifestyle on Urinary Bisphenol A Levels in School-Aged Children of Southern Italy: A Pilot Study. *Frontiers in Public Health*, 9: 626070. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.626070>
- Sha, L., Dey, P., Khess, C. R., & Khitz, K. K. (2021). The association of plasma acyl ghrelin level with alcohol craving in early abstinent alcohol dependent patients. *Journal of postgraduate medicine*, 67(1): 12–17. https://doi.org/10.4103/jpgm.JPGM_1018_20
- Senanayake, R., MacFarlane, J., van der Meulen, M., Bashari, W. A., & Gurnell, M. (2023). The Hypothalamic–Pituitary (Neuroendocrine) Axis. In Lynall, M. E., Jones, P. B., & Stahl, S. M. (Eds.) *Cambridge Textbook of Neuroscience for Psychiatrists* (pp. 287–299). Cambridge University Press.
- Sonavane, M., & Gassman, N. R. (2019). Bisphenol A co-exposure effects: a key factor in understanding BPA's complex mechanism and health outcomes. *Critical reviews in toxicology*, 49(5): 371–386. <https://doi.org/10.1080/10408444.2019.1621263>
- Sousa-Vidal, É. K., Henrique, G., da-Silva, R. E. C., & Serrano-Nascimento, C. (2023). Intrauterine exposure to di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) disrupts the function of the hypothalamus-

- pituitary-thyroid axis of the F1 rats during adult life. *Frontiers in Endocrinology*, 13: 995491. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.995491>
- Standing, D., Dandawate, P., & Anant, S. (2022). Prolactin receptor signaling: A novel target for cancer treatment - Exploring anti-PRLR signaling strategies. *Frontiers in Endocrinology*, 13, 1112987. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.1112987>
- Stanojlović, O., Hrnčić, D., Vojnović-Milutinović, D., Mladenović, D., & Šutulović, N. (2023). Environmental Impact on the Hypothalamus-Pituitary-Ovary Axis. In: Pivonello, R., Diamanti-Kandarakis, E. (eds) *Environmental Endocrinology and Endocrine Disruptors. Endocrinology. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39044-0_5
- Stevens, S., Bartosova, Z., Völker, J., & Wagner, M. (2024). Migration of endocrine and metabolism disrupting chemicals from plastic food packaging. *Environment international*, 189: 108791. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108791>
- Suchankova, P., Nilsson, S., von der Pahlen, B., Santtila, P., Sandnabba, K., Johansson, A., Jern, P., Engel, J. A., & Jerlhag, E. (2016). Genetic variation of the growth hormone secretagogue receptor gene is associated with alcohol use disorders identification test scores and smoking. *Addiction biology*, 21(2): 481–488. <https://doi.org/10.1111/adb.12277>
- Tell, L., & Lysenkov, S. (2014). Lungs as a crucial organ of the endocrine system ó new view on hormonal homeostasis (718.4). *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 28(S1). https://doi.org/10.1096/fasebj.28.1_supplement.718.4
- Tresguerres, A. F. J. (2010). Fisiología humana 4ª. Ed. Fisiología. (910 pp.) McGraw-Hill.
- Trindade, F. (2020). Nutritional Influences on Hormonal Health. In: Noland, D., Drisko, J., & Wagner, L. (eds). *Integrative and Functional Medical Nutrition Therapy* (pp. 517–532). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30730-1_31
- Utiger, R. D. (2024). Prolactin. *Physiology*. Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/prolactin>
- Vandenberg L. N. (2021). Endocrine disrupting chemicals and the mammary gland. *Advances in pharmacology*, 92: 237–277. <https://doi.org/10.1016/bs.apha.2021.04.005>
- Vindas-Smith, R., Vargas-Sanabria, D., & Brenes, J. C. (2022). Consumo de alimentos altamente procesados y de alta palatabilidad y su relación con el sobrepeso y la obesidad. *Población y Salud en Mesoamérica*, 19(2): 373-399. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44670274022>
- Vilches, A. M., & Legarralde, T. I. (2021). Aspectos biológicos de la complejidad humana. *Colección: Libros de Cátedra*. EDULP. <https://doi.org/10.35537/10915/121497>
- Vogel, C. F. A., Van Winkle, L. S., Esser, C., & Haarmann-Stemmann, T. (2020). The aryl hydrocarbon receptor as a target of environmental stressors - Implications for pollution mediated stress and inflammatory responses. *Redox Biology*, 34: 101530. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101530>
- Wang, W., Craig, Z. R., Basavarajappa, M. S., Hafner, K. S., & Flaws, J. A. (2012). Mono-(2-ethylhexyl) phthalate induces oxidative stress and inhibits growth of mouse ovarian antral follicles. *Biology of Reproduction*, 87(6): 152. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.112.102467>
- Weldon, R. H., Webster, M., Harley, K. G., Bradman, A., Fenster, L., Davis, M. D., Hubbard, A., Barr, D. B., Holland, N., & Eskenazi, B. (2010). Serum persistent organic pollutants and duration of

- lactation among Mexican-American women. *Journal of Environmental and Public Health*, 861757. <https://doi.org/10.1155/2010/861757>
- WHO, 2012. State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals–2012. *World Health Organization*. <https://www.who.int/publications/i/item/state-of-the-science-of-endocrine-disrupting-chemicals>
- Wu, H., Zhang, W., Zhang, Y., Kang, Z., Miao, X., & Na, X. (2021). Novel insights into di-(2-ethylhexyl)phthalate activation: Implications for the hypothalamus-pituitary-thyroid axis. *Molecular medicine reports*, 23(4): 290. <https://doi.org/10.3892/mmr.2021.11930>
- Yavuz, Y., Oyku-Ozen, D., Yagmur-Erol, Z., Goren, H., & Yilmaz, B. (2023). Effects of endocrine disruptors on the electrical activity of leptin receptor neurons in the dorsomedial hypothalamus and anxiety-like behavior in male mice. *Environmental pollution*, 324: 121366. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121366>
- Yılmaz B. (2022). Endokrin Bozucuların Güncel Durumu, Ağır Metaller, Poliklorlu Bifeniller (PCB), Parabenler, BHA, BHT. K. Şahin ve H. F. Keleştemur (Eds.). *Endokrin Bozucular ve Sağlık* (s. 11-34). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. <http://dx.doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-04-7.ch02>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores familiares: una revisión de alcance

Alcohol, Tobacco, and Nonprescription Drug Use in Family Caregivers: A Scoping Review

Mariana Vargas-Beltrán¹, Lorena Chaparro-Díaz^{2*}, Francisco Rafael Guzmán-Facundo³

¹ Facultad de Enfermería y Nutriología, Universidad autónoma de Chihuahua. Campus Universitario II. Circuito Universitario, Cd. Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125.

² Facultad de Enfermería. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Carrera 30 No. 45-03, Teusaquillo, Bogotá, Colombia

³ Facultad de Enfermería. Universidad Autónoma de Nuevo León. Mitras Centro, Av. Dr. José Eleuterio González 1500, Mitras Nte., 64460 Monterrey, N.L. C.P. 64460

*Correspondencia: olchaparro@unaledu.co (Lorena Chaparro-Díaz)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1800>

Recibido: 20 de diciembre de 2024; Aceptado: 05 de junio de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dra. Silvia Giono-Cerezo

Resumen

Introducción. Actualmente la sociedad está expuesta a diversas formas de drogas como alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos. Los cuidadores familiares de personas con enfermedades crónicas son vulnerables a altos niveles de ansiedad y al riesgo de consumo problemático de sustancias. Se considera necesario, examinar la evidencia científica disponible sobre el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores de personas con condiciones de salud crónicas, su relación con la sobrecarga del cuidado y su impacto en la salud de los cuidadores. **Metodología.** Revisión de alcance donde se realizó una búsqueda en 5 bases de datos en tres idiomas con 13 descriptores que fueron combinados y aplicados a los operadores booleanos. **Resultados.** Se seleccionaron 15 artículos que se clasificaron en 3 temáticas principales; consumo de alcohol, tabaco y drogas en cuidadores, estrategias de afrontamiento de los cuidadores y consumo de sustancias e impacto en la salud y comportamientos de riesgo. **Conclusión.** Los cuidadores familiares constituyen una población de riesgo para el inicio de comportamientos no saludables que incluyen el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos, este consumo está presente en mayor o menor medida en los cuidadores por lo que debe ser un tema que se explore y estudie a mayor profundidad.

Palabras clave: cuidadores, alcohol, tabaco, medicamentos no prescritos, revisión.

Abstract

Currently, society is exposed to various forms of drug supply such as alcohol, tobacco and non-prescribed drugs, and a vulnerable group to suffer the consequences of their use and abuse are family caregivers of people with chronic diseases. For this reason, it is considered necessary to examine the available scientific evidence on the use of alcohol, tobacco, and non-prescribed medications among caregivers of individuals with chronic health conditions, its relationship with caregiver burden, and its impact on caregivers' health. Methodology. Scoping review where a search in databases was carried out, as a search strategy DeCS and Mesh descriptors were included in the possible combinations, as well as boolean operators. Results. 15 articles were selected and classified into 3 main topics; alcohol, tobacco and drug use in caregivers, coping strategies of caregivers and impact on health and risk behaviors in caregivers. Conclusion. Family caregivers constitute a population at risk for the onset of unhealthy behaviors that include the consumption of alcohol, tobacco and non-prescribed drugs, this consumption is present to a greater or lesser extent in caregivers so it should be a topic to be explored and studied in greater detail.

Keywords: caregivers, alcohol, tobacco, non-prescription drug, review

1. Introducción

El cuidado no remunerado dentro de los hogares está en aumento en todo el mundo, en especial después de la pandemia por Covid-19. Si bien esta actividad altruista y de responsabilidad filial es importante para la sobrevivencia del ser humano y las sociedades, está generando un costo incalculable en la calidad de vida y la salud del cuidador, así como en la relación cuidador-paciente (Herrera et al., 2020; Gutiérrez y Cardozo, 2023; De Rosa et al., 2025).

Por otra parte, las enfermedades crónicas son condiciones que no tienen cura y comparten factores de riesgo comunes, tales como el consumo de tabaco y alcohol, el sobrepeso y la inactividad física. En este contexto, es necesario reconocer que los cuidadores representan una población en condición de cronicidad potencial, debido a la carga física y emocional que enfrentan. Esta situación se ve agravada por niveles elevados de estrés y por la adopción de hábitos de salud desfavorables (consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos), tal como lo evidencian estudios recientes (Son et al., 2023; Johnston et al., 2024).

Terassi et al. (2023) señalan que la carga de cuidadores familiares de personas mayores, el estrés y los síntomas depresivos impactan la salud de las personas cuidadas. Esta situación se explica por varios factores: el alto nivel de dependencia de las personas enfermas, la complejidad de los tratamientos, los efectos secundarios asociados a estos, y la extensa cantidad de cuidados que los familiares deben realizar o supervisar. Específicamente los cuidadores están expuestos al inicio o aumento del consumo de alcohol, tabaco y drogas como medicamentos no prescritos; sin embargo, los resultados son variados con respecto a la sobrecarga y el uso de sustancias (Delgado-Parada et al., 2014).

Por lo tanto, hay algunos autores que coinciden en que la sobrecarga del cuidador se puede considerar como un “factor de riesgo” para que el paciente pudiera caer en problemas de adicciones o recaer en hábitos no saludables como el consumo de sustancias (Martínez et al., 2011; Herrero, 2012; Moreno y Bravo, 2014). Los trastornos relacionados con el consumo de alcohol, tabaco y,

especialmente, de medicamentos no prescritos, se han asociado a diversas consecuencias en la dinámica del cuidado, incluyendo situaciones de dependencia entre la persona enferma y su cuidador. Algunos estudios indican que la principal causa es por la elevada incidencia de automedicación especialmente con psicofármacos como ansiolíticos, antidepresivos y analgésicos (Pajares, 2012; Delgado-Parada et al., 2014).

En el campo de la enfermería, el fenómeno del consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores de personas con enfermedades crónicas e incapacitantes ha sido escasamente abordado (Vargas, 2023). Comprender la situación de vulnerabilidad a la que están expuestos estos cuidadores, así como los riesgos para su salud asociados al consumo de estas sustancias, resulta fundamental para la disciplina. Esta comprensión puede orientar el diseño e implementación de acciones, planes de trabajo e intervenciones desde la enfermería y otros sectores, con el fin de prevenir y mitigar el desarrollo de problemas relacionados con el consumo en esta población. Debido a que no existen revisiones de literatura previas sobre el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en los cuidadores se requiere tener un acercamiento inicial, por tal razón, se planteó como objetivo examinar la evidencia científica disponible sobre el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores de personas con condiciones de salud crónicas, su relación con la sobrecarga del cuidado y su impacto en la salud de los cuidadores.

2. Métodos

2.1. Alcance

Se llevó a cabo una revisión de alcance con el fin de mapear sistemáticamente la investigación realizada en esta área tomando como referencia lo planteado en la guía para realizar revisiones de alcance sistemáticas propuesta por Peters et al. (2015); así como, para identificar, analizar y responder a las preguntas, ¿cuál es la evidencia disponible sobre el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores familiares? y ¿el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos se relaciona con el impacto en la salud y/o sobrecarga del cuidador familiar?

Se realizó la búsqueda de artículos en las siguientes bases de datos: PubMed, EBSCO, ScienceDirect, Scopus y Web of Science, en los idiomas inglés, español y portugués con un límite de tiempo de año de publicación de 2011 al 2021, se utilizaron los términos DeCS y MeSH en español y en inglés de *Caregivers, Alcohol, Alcoholism, Alcohol Drinking, Alcohol-Related Disorders, Smoking, Tobacco Smoking, Cigarette Smoking, Nonprescription Drugs, Self Medication, Burden, Drug Utilization y Chronic disease*, utilizando el operador booleano AND.

2.2. Selección de los artículos

Los criterios de inclusión para la selección de artículos consistieron en artículos científicos, cuantitativos y cualitativos a texto completo que abordaron el tema de consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores familiares de personas con alguna enfermedad crónica. La selección y clasificación de los artículos se presenta en la Fig.1. Para completar los 15 artículos seleccionados, se priorizaron aquellos que describieran los tipos de consumo previamente mencionados. Dado que en los títulos y resúmenes no siempre se especifica si el consumo

corresponde al paciente o al cuidador, se incluyeron algunos estudios centrados en la diada, siempre que el cuidador estuviera explícitamente involucrado en el análisis del consumo.

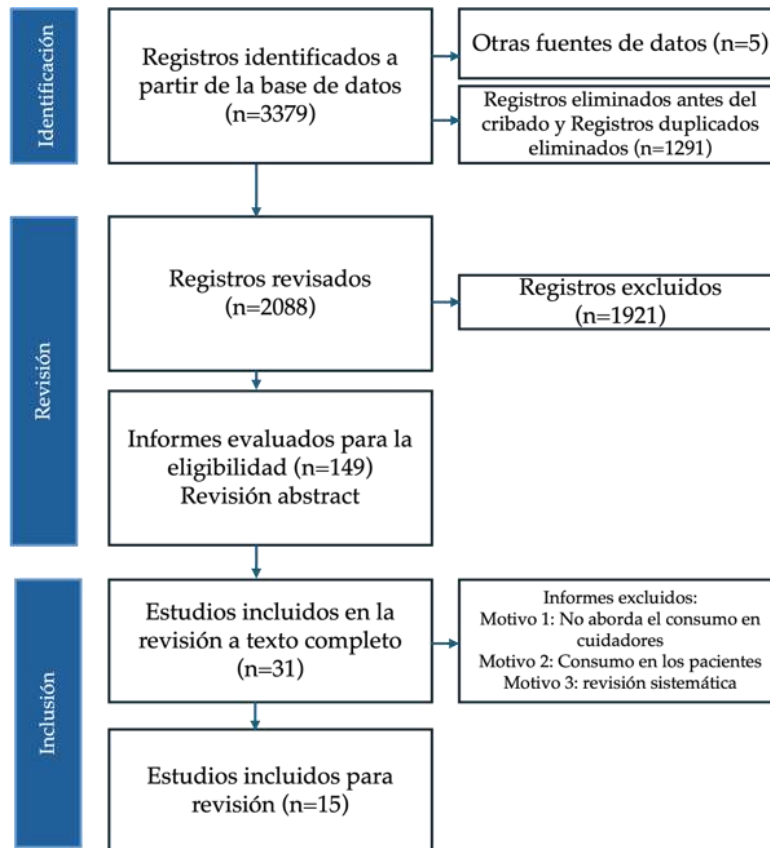


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de revisión de alcance adaptado de la declaración PRISMA de Moher y colegas (2015)

Figure 1. Flowchart of the scoping review process adapted from the PRISMA statement of Moher and colleagues (2015)

2.3. Análisis de los artículos

Se utilizó el programa Microsoft Excel para la captura y análisis de la información de los artículos. En la base de datos se incluyeron las variables de análisis de Cuartil SCImago® revista, tipo de estudio, diseño estudio, objetivo, muestra, participantes, instrumentos utilizados, país, variables investigadas, hallazgos, resultados principales, implicaciones para la práctica, recomendaciones y aportes relevantes. Aunque generalmente no se realiza una evaluación formal de la calidad metodológica de los estudios incluidos (Peters et al., 2015), se decidió realizar el ejercicio para valorar la calidad de los estudios seleccionados para la revisión de alcance los cuales se sometieron a una evaluación de acuerdo a su metodología con las escalas del Instituto Joanna Briggs (JBI, 2020), el cual propone un proceso valoración de la evidencia de la investigación en relación a la calidad metodológica de un estudio para así determinar en qué medida el estudio ha abordado, la posibilidad de sesgo en su diseño, realización y análisis.

Los criterios éticos fueron considerados a la luz del respeto por la autoría de los investigadores de las investigaciones originales y que los estudios cumplieran con criterios éticos en su contenido.

3. Resultados

En cuanto a la metodología empleada de los estudios seleccionados en la revisión, el 100 % fueron de abordaje cuantitativo; de estos se identificaron descriptivos (1 estudio), exploratorios (1 estudio) y transversales (8 estudios) y longitudinales (2 estudios) para identificar prevalencias de consumo de tabaco, alcohol y medicamentos no prescritos, y estudios de correlación entre variables sociodemográficas y algunas relacionadas con el cuidado y el afrontamiento. De otra parte, los estudios en su mayoría han sido realizados en contexto de países de altos y medianos ingresos, solo hay uno que hace referencia a ser un estudio de bajos ingresos y otro en Latinoamérica.

En lo que respecta a los años de los artículos seleccionados, se distribuyen en el 2011 (2 artículos), en 2012, 2016 y 2017 (1 artículo respectivamente), en 2015 y 2020 (3 artículos) y encontrándose la mayoría de las publicaciones del año 2019 (4 artículos), lo que demuestra que los estudios que abordan esta temática van en aumento. En los tipos de cuidadores que se encontraron en los artículos seleccionados se destacan los cuidadores de personas con cáncer (5 artículos) siendo éstos los más reportados en los artículos, seguido de los cuidadores de personas con algún tipo de demencia (3 artículos), cuidadores de personas con discapacidad (2 artículos), cuidadores de personas con trastorno mental (2 artículos) y cuidadores de personas con diferentes enfermedades crónicas, personas dependientes, personas sometidas a trasplante y personas con demencia (1 artículo respectivamente) (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de estudios incluidos en la revisión de literatura

Table 1. Matrix of Studies Included in the Literature Review

Autor(es)	Año de publicación	Título del estudio	Objetivo del estudio	Muestra del estudio	Diseño	País
Martín, G. et al.	2016	Consumption of drugs and nonpharmacological therapies in caregivers of patients with Alzheimer's Disease: a case-control study in Madrid	Evaluar si los cuidadores de pacientes con demencia consumen más medicamentos que la población general, lo que indica patologías subyacentes.	91 cuidadores de pacientes con demencia comparado con 28 personas	Transversal	España
Salgado-García, F.I. et al.	2015	Smoking and Smoking Increase in Caregivers of Alzheimer's Patients.	Examina cómo los factores de estrés y los recursos de afrontamiento de los cuidadores explican el estado de tabaquismo y el reciente aumento del mismo.	642 cuidadores de pacientes con enfermedad de Alzheimer	Análisis secundario de Ensayo clínico	Estados Unidos

Webber, K. et al.	2020	Alcohol and drug use disorders in patients with cancer and caregivers: effects on caregiver burden.	Establecer la prevalencia de los trastornos por consumo de alcohol y drogas en una gran cohorte de pacientes con cáncer avanzado y sus cuidadores. Evaluar la relación entre los trastornos por consumo de alcohol y drogas y los síntomas de los pacientes y la carga de los cuidadores.	507 de pacientes con cáncer avanzado y sus cuidadores	Descriptivo	Reino Unido
Beesley, V. L et al.	2011	Loss of lifestyle: health behavior and weight changes after becoming a caregiver of a family member diagnosed with ovarian cancer.	Exploramos los cambios de comportamiento y sus determinantes en los cuidadores de mujeres con cáncer de ovario.	101 cuidadores de pacientes con cáncer de ovario	Correlacional	Australia
Baharudin, A. D. et al.	2019	The associations between behavioral-psychological symptoms of dementia (BPSD) and coping strategy, burden of care and personality style among low-income caregivers of patients with dementia	Determinar la asociación entre los Síntomas Conductuales y Psicológicos de la Demencia (SCPD) y la carga del cuidador, y el papel mediador de la estrategia de afrontamiento y el estilo de personalidad de los cuidadores de pacientes con demencia (PWD).	202 cuidadores (formales e informales) de pacientes con demencia con bajos ingresos	Transversal	Malasia
Baumstarck, K. et al.	2017	Assessment of coping: a new french four-factor structure of the brief COPE inventory	Validar una estructura de 4 factores de la versión francesa del COPE Breve en una muestra francesa de individuos que se enfrentan a un acontecimiento vital singular, como el cáncer, incluyendo a pacientes y a sus cuidadores.	398 pacientes oncológicos y sus cuidadores	Transversal	Francia

Chen, X. et al.	2014	Smoking and perceived stress in relation to short salivary telomere length among caregivers of children with disabilities	Examinar si el tabaquismo y el estrés percibido se asociaban con un acortamiento del NT salival entre los cuidadores principales de niños con discapacidades.	89 cuidadores de niños con discapacidad	Transversal	Chile
Joutsenniemi, K. et al.	2011	Psychiatric comorbidity in couples: a longitudinal study of 202,959 married and cohabiting individuals	Examinar si los trastornos psiquiátricos y somáticos de la pareja son factores de riesgo para la incidencia de trastornos psiquiátricos entre individuos no psiquiátricos en la línea de base.	202.959 cuidadores casados o en convivencia con una pareja con diagnóstico de algún trastorno psiquiátrico	Longitudinal	Finlandia
Goetzinger, A. et al.	2012	Stress and coping in caregivers of patients awaiting solid organ transplantation	Caracterizar los niveles de sobrecarga y ajuste psicológico entre los cuidadores de personas en espera de un trasplante de órgano sólido y examinar las relaciones entre la sobrecarga, los estilos de afrontamiento y el ajuste psicológico de los cuidadores de trasplantes.	621 cuidadores de pacientes sometidos a trasplante de órganos	Transversal	Estados Unidos
Lee, K. C. et al	2015	Sleep disturbances and related factors among family caregivers of patients with advanced cancer	investigar las alteraciones del sueño entre los CF de pacientes con cáncer avanzado y determinar los predictores del sueño.	172 cuidadores de pacientes con cáncer avanzado	Descriptivo Transversal	Taiwán
Pérez-Cruz, et al.	2019	Coping and Anxiety in Caregivers of Dependent Older Adult Relatives	Analizar la relación entre el afrontamiento y la ansiedad en cuidadores de familiares mayores dependientes.	198 cuidadores de adultos mayores	Transversal	España

Stacey, A. F. et al.	2019	Biomedical health profiles of unpaid family carers in an urban population in South Australia	Comparar el estado de salud general y biomédico de los cuidadores informales con los no cuidadores de la misma población con énfasis en las diferencias de género.	191 cuidadores informales	De cohorte longitudinal	Australia
Bailey, J. M. et al.	2019	A survey of the prevalence of modifiable health risk behaviors among carers of people with a mental illness	Determinar prevalencia de comportamientos de riesgo para la salud del cuidador (consumo inadecuado de frutas y verduras, actividad física inadecuada, consumo nocivo de alcohol y tabaquismo); interés en cambiar 'en riesgo' comportamientos; y posibles asociaciones de características sociodemográficas con el estado de riesgo y el interés en el cambio.	144 cuidadores de personas con diferentes enfermedades mentales	Exploratorio	Australia
Denham, A. et al.	2020	An online cross-sectional survey of the health risk behaviors among informal caregivers.	Evaluar los comportamientos de riesgo para la salud auto informados de bajo consumo de frutas y verduras, baja actividad física, tabaquismo actual y consumo peligroso de alcohol. Examinar las variables demográficas, de cuidados y del país de residencia asociadas con cada comportamiento de riesgo para la salud. Informar sobre la participación en	384 cuidadores de personas con enfermedad crónica o discapacidad	Transversal	Australia, Canadá, Nueva Zelanda, Reino Unido y Estados Unidos

			múltiples conductas de riesgo para la salud.			
Inci, H. et al.	2020	Comparison of stress coping attitudes in caregivers for cancer and non-cancer patients on palliative care.	Comparar los niveles de estrés y las actitudes de afrontamiento de los cuidadores que prestan cuidados paliativos a pacientes con cáncer y sin cáncer	80 cuidadores de personas en cuidado paliativo con y sin cáncer	No aleatorio y controlado	Turquía

En cuanto a los contenidos se identificaron las siguientes temáticas principales: Consumo de alcohol, tabaco y drogas en cuidadores, estrategias de afrontamiento de los cuidadores e impacto en la salud y comportamientos de riesgo en cuidadores. Se llegó a esta organización inicial a partir el objetivo para especificar la existencia del consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos y la sobrecarga e impacto. Sin embargo, surgió la categoría de afrontamiento teniendo en cuenta que en estos instrumentos siempre se incluye uno o varios ítems relacionados con el consumo de sustancias. En la tabla 2 se presenta una síntesis que permite identificar los factores del cuidado y los cuidadores que se relacionan con los tipos de consumo reconocidos en la literatura analizada.

Tabla 2. Factores predisponentes del cuidado y los cuidadores con el tipo de consumo realizado

Table 2. Predisposing factors related to caregiving and caregivers by type of substance use

Autor(es)	Consumo identificado	Factores predisponentes
Martín, G. R. et al.	Medicamentos (ansiolíticos, antidepresivos y antiplaquetarios)	Sobrecarga Ser mujer y alto nivel educativo (excepto antiplaquetarios).
Salgado-García et al.	Tabaco	Estrés financiero Sobrecarga Síntomas depresivos Cuidadores jóvenes Baja habilidad de cuidado
Webber, K. et al.	Alcohol y abuso de drogas	Sobrecarga Impacto físico y psicológico
Beesley, V. L. et al.	Tabaco y alcohol	Bajo nivel educativo Ansiedad y depresión Asumir otros roles adicionales Sexo del cuidador Relación con el paciente
Baharudin et al.	Consumo de sustancias a partir de escala de afrontamiento	No se relaciona con la carga del cuidador

Baumstarck et al.	Consumo de sustancias a partir de escala de afrontamiento	Estrés
Chen, X. et al.	Tabaco	Estrés Tiempo que lleva como cuidador asociada a la edad del paciente (niñez)
Joutsenniemi et al.	Abuso de sustancias	Cohabitación con la pareja con trastorno mental
Goetzinger et al.	Tabaco y alcohol a partir de escalas de afrontamiento	Angustia psicológica
Lee, K.-C. et al. Pérez-Cruz et al.	Tabaco y alcohol Consumo de sustancias a partir de escala de afrontamiento	No se relacionó con trastornos del sueño No se encontraron relación con otras variables del cuidado
Stacey et al.	Tabaco y alcohol	No encontraron relaciones con la sobrecarga
Bailey et al.	Tabaco y alcohol	Ser cuidador de una persona con trastorno mental
Denham et al.	Alcohol	Edad del cuidador (18 y 45 años) País de residencia (Australia)
Inci, H. et al	Tabaco Consumo de sustancias a partir de escala de afrontamiento	Ser mujer Tiempo como cuidador (años) Cuidar una persona sin cáncer

a. Consumo de alcohol, tabaco y drogas en cuidadores

Los artículos revisados evidencian que los cuidadores familiares tienen un mayor riesgo de consumo de alcohol, tabaco y drogas (ansiolíticos, antidepresivos y antiplaquetarios) (Chen et al., 2015; Martín et al., 2016). Asumir el rol de cuidador implica en la mayoría de los casos esfuerzos que superan los recursos propios además de pocas estrategias de afrontamiento efectivas (Salgado, 2015). Por esta razón y la sobrecarga los hace más vulnerables al aumento o inicio de consumo estas sustancias y otros tipos de drogas (Salgado, 2015; Webber, 2020).

Los hallazgos cuantitativos en estos artículos evidencian que existe consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores familiares de personas con Alzheimer, personas que padecen algún tipo de cáncer y con alguna discapacidad (Chen et al., 2015; Salgado, 2015; Martín et al., 2016; Webber, 2020). Se encontró, por ejemplo, evidencia de un efecto conjunto del tabaquismo y altos niveles de estrés percibido en un biomarcador del envejecimiento celular (longitud de los telómeros en saliva) y el estrés oxidativo acumulativo lo cual se ha relacionado con un mayor riesgo de diversos resultados adversos para la salud, en este caso de los cuidadores considerada población vulnerable para los cuales se deben desarrollar intervenciones efectivas para dejar de fumar y estrategias de manejo del estrés (Chen et al., 2015).

En los estudios de Salgado et al. (2015) el 39 % (n=642) de los cuidadores informaron haber fumado y el 25 % de estos que fuman reportaron un aumento en el tabaquismo en los últimos 30 días, además es importante destacar que los fumadores y las personas que aumentaron el riesgo de fumar se enfrentaron a más factores estresantes, como más carga y depresión, y mostraron menos recursos para hacer frente a la situación de ser cuidador familiar. En relación con los factores como la carga de cuidado, Webber et al. (2020), reportaron que los cuidadores evaluados obtuvieron resultados positivos en las pruebas de detección de trastornos de consumo de alcohol y abuso de drogas. Además, se encontró que la carga del cuidado fue significativamente mayor entre aquellos que presentaban indicadores positivos de consumo problemático de esas sustancias.

b. Estrategias de afrontamiento de los cuidadores y consumo de sustancias

En esta categoría se identifica que el consumo de sustancias es una de las estrategias de afrontamiento que se encuentra clasificada como estrategia de evitación, negación y/o desadaptativa y que puede ser utilizada por los cuidadores familiares ante la situación del cuidado de la persona enferma (Goetzinger et al., 2012; Baumstark et al., 2017; Baharudin et al., 2019; Pérez et al., 2019; Inci et al., 2020), en este sentido, resulta importante destacar que aunque en el estudio de Baharudin et al. (2019) el consumo de sustancias no tuvo correlación significativa con la carga del cuidador, es una estrategia que en menor medida, está siendo utilizada por los cuidadores. Así mismo, las estrategias evitativas también se utilizaron con más frecuencia y se asociaron a la angustia, estrés y carga del cuidador (Goetzinger et al., 2012; Baumstarck et al., 2017).

El estudio de Inci et al. (2020) en el cual se compararon dos grupos de cuidadores de personas con y sin cáncer, los resultados encontraron que el mayor número de cuidadores que fumaba cigarrillos eran los que cuidaban a personas sin cáncer y esto fue estadísticamente significativo, datos contrarios a las estrategias de afrontamiento no funcionales que incluyen el uso de sustancias donde no se observaron diferencias significativas estadísticamente en los dos grupos de cuidadores, estos hallazgos de nuevo ponen de manifiesto que el consumo de tabaco como medida de afrontamiento ante la situación de cuidador es un problema presente que requiere ser más estudiado y relacionado con más variables. Por otro lado, en lo que se refiere a las estrategias de afrontamiento que utiliza el cuidador ante la ansiedad del cuidado de una persona mayor dependiente, se destaca que las estrategias del uso de sustancias fueron de las menos utilizadas (Pérez et al., 2019).

c. Impacto en la salud y comportamientos de riesgo en cuidadores

En esta categoría se destaca el impacto en la salud y comportamientos de riesgo en cuidadores, identificándose seis artículos que mencionan el consumo del alcohol, tabaco y drogas (Beesley et al., 2011; Joutsenniemi et al., 2011; Lee et al., 2015; Bailey et al., 2019; Stacey et al., 2019; Denham et al., 2020). Estos estudios abordan los estilos de vida del cuidador y evidencian que un porcentaje de ellos consume bebidas alcohólicas, se identifica como fumador, y, además, reporta cambios negativos en su salud desde que asumió el rol de cuidado (Beesley et al., 2011).

El estudio de Denham et al. (2020) evidenció que los cuidadores de personas con cáncer presentaban niveles más altos de consumo de tabaco. Asimismo, el 60 % de los cuidadores evaluados reportaron un consumo riesgoso de alcohol (n = 226), siendo esta proporción aún mayor en cuidadores de personas con accidente cerebrovascular (n = 44, 62,0 %). Además, se identificó que los cuidadores

entre 18 y 45 años tenían una probabilidad tres veces mayor de presentar este tipo de consumo en comparación con cuidadores de 65 años o más.

En los resultados más relevantes del estudio de Bailey et al. (2019), encontraron que la prevalencia de riesgo identificada en los comportamientos de consumo perjudicial crónico y/o en atracones de alcohol y el tabaquismo examinado fue considerable. En comparación con los encontrados por Stacey et al. (2019) en lo que se refiere a las variables de tabaquismo resalta que 27 de los 191 cuidadores eran fumadores actuales, 60 cuidadores presentaron bajo riesgo para el alcohol y 3 cuidadores riesgo intermedio a muy alto; sin embargo, cuando lo analizaron con las demás variables como perfiles biomédicos y características sociodemográficas no fue significativo; finalmente, en el estudio de Lee et al. (2015) también se encontró consumo de alcohol igual o mayor a 3 veces por semana y el hábito de fumar entre los cuidadores.

Estos estudios generan alertas sobre la salud de los cuidadores y los riesgos para la salud que puede implicar la decisión de consumo de alcohol y tabaco (Bailey et al., 2019). Finalmente, el análisis de los estudios encontrados pone de manifiesto la asociación de los trastornos por consumo de sustancias con la carga del cuidador, los comportamientos de riesgo para la salud de los cuidadores e indican la importancia de la detección y el apoyo a los cuidadores (Bailey et al., 2019; Webber, 2020). Los profesionales de la salud y en especial enfermería deben tener en la valoración integral de la diada (persona con enfermedad crónica- cuidador familiar) el estado de salud, los factores de riesgo y las morbilidades de los cuidadores para proponer acciones de apoyo y prevención de conductas no saludables (Stacey et al., 2015).

4. Discusión

Asumir el rol de cuidador de personas con enfermedades crónicas constituye un factor de riesgo para la salud del propio cuidador. Esta revisión de literatura explora dicha hipótesis, la cual ha sido documentada durante más de cuatro décadas, especialmente en contextos de cuidado a personas mayores y con enfermedad de Alzheimer. En este análisis, se revela un panorama crítico que trasciende las condiciones clínicas específicas del paciente, al evidenciar las implicaciones del cuidado en sí mismo: aliviar el sufrimiento, atender la dependencia tanto de niños como de adultos, y sostener el funcionamiento del sistema de salud, particularmente en enfermedades de alto impacto como el cáncer.

Los resultados identificados evidencian que existen condicionantes como son las estrategias de afrontamiento que pueden intervenir en la aparición de adicciones y estos a su vez generar impacto en la salud de los cuidadores. Empezar a reconocer su existencia es una forma de abordar riesgos que podrían ser incluidos en la valoración de quienes están expuestos al estrés relacionado con el ser cuidador.

El consumo de drogas incluidos el alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos se ha convertido en uno de los problemas de salud pública con mayor relevancia a nivel mundial (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, 2018), así mismo se ha demostrado que su consumo comienza o aumenta cuando se presentan condiciones que alteran el estilo de vida de las personas como el estrés, la depresión, ansiedad entre otros (Villareal et al., 2020). Este estudio identifica un riesgo latente asociado al impacto del cuidado, especialmente cuando se emplean estrategias de afrontamiento inadecuadas, como el consumo de sustancias, el cual está en aumento. Se ha reconocido que al menos

el 20 % de los cuidadores de adultos y padres/cuidadores informan el uso de sustancias, siendo cuatro veces más probable que los padres/cuidadores consuman cannabis en comparación con quienes no son cuidadores. El estrés es uno de los factores desencadenantes de este consumo, y puede manifestarse a través de trastornos del sueño y síntomas adversos de salud mental (Varma et al., 2024). En esta revisión 3 de los 15 estudios reconocen el estrés como un factor predisponente, en especial el financiero, lo cual es importante mencionarlo toda vez que los cuidadores no remunerados deben hacer toda serie de estrategias para atender la salud de su familiar y descuidan su propia salud al no contar con seguros médicos.

El estrés asociado al rol de cuidados suele estar estrechamente asociado a la sobrecarga; sin embargo, los riesgos más significativos están en la salud mental con la aparición de ansiedad y depresión (Docherty et al., 2024). Los biomarcadores de estrés permiten identificar el nivel de riesgo y su impacto a largo plazo. Los cuidadores de pacientes con cáncer de cabeza y cuello que enfrentan malestar psicológico, se ha encontrado que está relacionado con interleucinas que producen procesos inflamatorios, lo que sugiere una conexión entre el estrés del cuidado y procesos fisiológicos inflamatorios. Además, se ha identificado que factores genéticos y sociodemográficos (como la situación laboral, el tabaquismo y la juventud) influyen en este riesgo (Pequeno et al., 2022). Otros estudios sobre cuidadores conyugales de personas con deterioro cognitivo han confirmado este hallazgo, lo que resalta la importancia de abordar el estrés psicológico de los cuidadores de manera temprana para reducir el riesgo (Jeon et al., 2024). En cuanto a las intervenciones, se ha demostrado que la intervención musical tiene efectos positivos en la disminución de los biomarcadores del estrés en los cuidadores (cortisol y Dehydroepiandrosterone sulfate-DHEA-S), aunque el mismo efecto no se observa en los pacientes (Emami et al., 2024).

El consumo de tabaco también fue identificado en los estudios y es un mecanismo de afrontamiento utilizado por los cuidadores. Dado que se trata de una sustancia legal, muchos de ellos podrían percibir su uso como inofensivo, lo que representa un riesgo silencioso. Esta percepción puede generar una falsa sensación de tranquilidad respecto al impacto en su salud, cuyos efectos se reconocen a largo plazo. Huddleston et al. (2022) reporta que los cuidadores utilizan estrategias para abordar el hábito de fumar, lo cual evidencia una mayor indagación sobre las creencias y prácticas que los cuidadores adoptan bajo condiciones de estrés asociadas al cuidado.

Se encontró que las personas más jóvenes presentan un mayor riesgo de consumo de alcohol, se tendrá que indagar con investigación si esto puede estar relacionado con el hecho de asumir roles adicionales al de ser cuidador, ser estudiante o incluso trabajador. En cuanto a los mecanismos de afrontamiento, se ha identificado que, para los cuidadores de pacientes psiquiátricos, incrementar la religiosidad puede ser una forma de abordar esta situación, según Kassem et al. (2021) y que la compasión de cuidadores jóvenes, con niveles educativo no tan altos y menor tiempo de cuidado (en años) puede hacer que disminuya el estrés (Uğurlu et al., 2024).

Esta revisión deja abiertas algunos vacíos de futura investigación que pueden incluir biomarcadores para identificar riesgo de estrés relacionado con el cuidado como punto de partida para la valoración inicial, identificar los mecanismos de afrontamiento y abordar mediante intervenciones holísticas que lleven a los cuidadores a mantener el control de situaciones de riesgo que los lleve a las adicciones.

Los vacíos de investigación identificados apuntan a la necesidad de mediciones específicas para valorar el uso de tabaco, alcohol y medicamentos no prescritos en estudios con cuidadores. Estas mediciones deberían compararse no solo en función de la enfermedad del paciente, sino en función

del rol del cuidador y condiciones de cuidado. Así mismo, los mecanismos de afrontamiento deben ser integrados a este análisis, para identificar perfiles de cuidadores con mayor riesgo de incurrir al consumo de sustancias incluyendo tabaco, alcohol, medicamentos no prescritos y nuevas drogas emergentes, especialmente en cuidadores jóvenes. Se requiere ampliar el enfoque del fenómeno mediante investigación cualitativa, dado que no se identificaron estudios; si bien podrían presentarse algunos hallazgos, no se les otorga un papel central en los análisis y por ende no son identificados en las bases de datos.

Es pertinente considerar que dentro de las limitaciones de la presente revisión es la temporalidad de su publicación, por lo que se requerirá una actualización permanente del fenómeno. Adicionalmente, el covid-19 aunque se dio en la ventana de observación, puede que las publicaciones sean de investigaciones realizadas antes de pandemia y no tengan estos análisis

5. Conclusiones

Los resultados de la revisión bibliográfica apuntan a una conexión entre las estrategias de afrontamiento utilizadas por los cuidadores familiares y su consumo de sustancias nocivas. Sin embargo, se requiere de investigaciones más profundas, a largo plazo, para establecer con claridad la magnitud y la naturaleza de esta relación. Estos hallazgos iniciales resaltan la necesidad de incluir la evaluación de estas prácticas en futuras investigaciones sobre la salud de los cuidadores, considerando el papel fundamental que juega la sobrecarga en su bienestar.

Se debe considerar que el tema de consumo de sustancias como el alcohol, tabaco y drogas es un tema sensible para la población en general que requiere un abordaje complejo para ser investigado, en el caso de los cuidadores familiares resulta aún más complejo de abordar ya que por lo general lo que se espera del cuidador es que asuma las funciones del cuidado de la persona enferma e incluso que deje de lado sus propias necesidades de salud, por lo que aceptar abiertamente que se tiene un problema con el consumo abusivo de estas sustancias no es fácil de estudiar.

La evidencia disponible sobre el consumo de alcohol, tabaco y medicamento no prescritos en cuidadores familiares es limitada y fragmentaria. Los estudios encontrados no ofrecen resultados concluyentes respecto a la prevalencia real de estas conductas ni a su relación con la sobrecarga o el impacto en la salud de quienes ejercen el rol de cuidado. Esta escasez de información representa un desafío para la investigación futura, al tiempo que revela la necesidad de profundizar en los factores que motivan este tipo de consumo. Se requieren estudios que permitan comprender con mayor precisión por qué recurren a estas sustancias, cómo se vinculan con la carga emocional y funcional del cuidado y de qué manera se relacionan con otros comportamientos de riesgo para la salud del cuidador.

En definitiva uno de los hallazgos más relevantes de esta revisión de alcance es que los cuidadores familiares constituyen una población de riesgo para el inicio de comportamientos no saludables que incluyen el consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos, y este consumo está presente en mayor o menor medida en los cuidadores participantes de los estudios, por lo que resulta relevante continuar estudiando este tema para generar más evidencia científica que contribuya a entender mejor este fenómeno.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no tienen conflicto de interés con la publicación de los resultados de la revisión.

Declaración

Los autores declaran que en la preparación de este manuscrito se utilizó inteligencia artificial generativa (ChatGPT, OpenAI) exclusivamente como herramienta de apoyo para la redacción inicial, la traducción del texto de los títulos de las tablas y la revisión de la citación Norma APA 7ta edición con un [GPT específico](#). Todas las ideas, análisis, interpretaciones y conclusiones presentadas son producto del juicio, revisión y responsabilidad exclusiva de los autores humanos.

6. Referencias

- Bailey, J. M., Regan, T. W., Bartlem, K. M., Wiggers, J. H., Wye, P. M., & Bowman, J. A. (2019). A survey of the prevalence of modifiable health risk behaviors among carers of people with a mental illness. *BMC Public Health*, 19: 1240. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7577-4>
- Beesley, V. L., Price, M. A., Webb, P. M., Australian Ovarian Cancer Study Group, & Australian Ovarian Cancer Study—Quality of Life Study Investigators. (2011). Loss of lifestyle: Health behavior and weight changes after becoming a caregiver of a family member diagnosed with ovarian cancer. *Supportive Care in Cancer* 19: 1949–1956. <https://doi.org/10.1007/s00520-010-1035-2>
- Baharudin, A. D., Din, N. C., Subramaniam, P., & Razali, R. (2019). The associations between behavioral-psychological symptoms of dementia (BPSD) and coping strategy, burden of care and personality style among low-income caregivers of patients with dementia. *BMC Public Health*, 19(Suppl 4): 447. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-6868-0>
- Baumstarck, K., Alessandrini, M., Hamidou, Z., Auquier, P., Leroy, T., & Boyer, L. (2017). Assessment of coping: a new french four-factor structure of the brief COPE inventory. *Health and Quality of Life Outcomes*, 15(1): 8. <https://doi.org/10.1186/s12955-016-0581-9>
- Chen, X., Velez, J. C., Barbosa, C., Pepper, M., Andrade, A., Stoner, L., De Vivo, I., Gelaye, B., & Williams, M. A. (2015). Smoking and perceived stress in relation to short salivary telomere length among caregivers of children with disabilities. *Stress: The International Journal on the Biology of Stress*, 18(1): 20–28. <https://doi.org/10.3109/10253890.2014.969704>
- Delgado-Parada, E., Suárez-Álvarez, Ó., Del Valle, R. D. D., Valdespino-Páez, I., Sousa-Ávila, Y., & Braña-Fernández, G. (2014). Características y factores relacionados con sobrecarga en una muestra de cuidadores principales de pacientes ancianos con demencia. *Semergen - Medicina de Familia*, 40(2): 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.semerg.2013.04.006>
- De Rosa, C. B., Holmes, A., Wang, W., & Chang, Y. P. (2025). The association between caregiving burden, the caregiving relationship, and caregiver health. *Journal of Gerontological Nursing*, 51(5): 27–34. <https://doi.org/10.3928/00989134-20250310-01>
- Denham, A. M. J., Wynne, O., Baker, A. L., Spratt, N. J., Turner, A., Magin, P., Palazzi, K., & Bonevski, B. (2020). An online cross-sectional survey of the health risk behaviours among informal caregivers. *Health Promotion Journal of Australia*, 31(3): 423–435.

- <https://doi.org/10.1002/hpja.296>
- Docherty, C., Quasim, T., MacTavish, P., Devine, H., O'Brien, P., Strachan, L., Lucie, P., Hogg, L., Shaw, M., & McPeake, J. (2024). Anxiety and depression following critical illness: A comparison of the recovery trajectories of patients and caregivers. *Australian Critical Care*, 37(6): 896–902. <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2024.04.005>
- Emami, A., Jun, J., Theorell, T., Engström, G., & Berglund, L. (2024). Day-to-day variability of stress biomarkers during a music intervention in people living with dementia and their family caregivers. *Science Progress*, 107(3): 368504241263692. <https://doi.org/10.1177/00368504241263692>
- Goetzinger, A. M., Blumenthal, J. A., O'Hayer, C. V., Babyak, M. A., Hoffman, B. M., Ong, L., Davis, R. D., Smith, S. R., Rogers, J. G., Milano, C. A., Smith, A. D., Kuo, P. C., & Palmer, S. M. (2012). Stress and coping in caregivers of patients awaiting solid organ transplantation. *Clinical Transplantation*, 26(1): 97–104. <https://doi.org/10.1111/j.1399-0012.2011.01431.x>
- Gutiérrez-Ramírez, J. P., & Cardozo-García, Y. (2023). Adoptar el rol de cuidador familiar de forma inesperada, un cambio drástico. *Investigación en Enfermería: Imagen y Desarrollo*, 25. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ie25.arcf>
- Herrera-Merchán, E., Laguado-Jaimes, E., & Pereira-Moreno, L. J. (2020). Daños en salud mental de cuidadores familiares de personas con Alzheimer. *Gerokomos*, 31(2): 68–70. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1134-928X2020000200002
- Herrero, C. M. B. (2012). Factores de riesgo del cansancio del cuidador. *Revista Enfermería CyL*, 4(2): 89–97. <https://oa.mg/work/1550956481>
- Huddleston, L., Shoesmith, E., Pervin, J., Lorencatto, F., Watson, J., & Ratschen, E. (2022). A systematic review of mental health professionals, patients, and carers' perceived barriers and enablers to supporting smoking cessation in mental health settings. *Nicotine & Tobacco Research*, 24(7), 945–954. <https://doi.org/10.1093/ntr/ntac004>
- Inci, H., Kilincel, O., Inci, F., Karatas, F., & Adahan, D. (2020). Comparison of stress coping attitudes in caregivers for cancer and non-cancer patients on palliative care. *Medycyna Paliatywna*, 12(1): 18–24. <https://www.termedia.pl/Comparison-of-stress-coping-attitudes-in-caregivers-for-cancer-r-and-non-cancer-patients-on-palliative-care,59,40802,1,1.html>
- Joanna Briggs Institute. (2020). JBI's critical appraisal tools. <https://jbi.global/critical-appraisal-tools>
- Jeon, S. Y., Yang, H. W., Son, B. R., Baek, J., & Kim, J. L. (2024). Caregiving-related depression increases neuroinflammation in spousal caregivers to individuals with cognitive impairment: A longitudinal study. *Journal of Gerontology: Series A*, 79(11): glae235. <https://doi.org/10.1093/gerona/glae235>
- Joutsenniemi, K., Moustgaard, H., Koskinen, S., Ripatti, S., & Martikainen, P. (2011). Psychiatric comorbidity in couples: a longitudinal study of 202,959 married and cohabiting individuals. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, 46(7): 623–633. <https://doi.org/10.1007/s00127-010-0228-9>
- Johnston, E. A., Collins, K. E., Vicario, J. N., Sibthorpe, C., Ireland, M. J., & Goodwin, B. C. (2024). Changes in rural caregivers' health behaviors while supporting someone with cancer: A qualitative study. *Cancer Medicine*, 13(7): e7157. <https://doi.org/10.1002/cam4.7157>
- Kassem, M., Rahme, C., Hallit, S., & Obeid, S. (2021). Is the presence of a psychiatric patient at home associated with higher addictions (alcohol, cigarette, and waterpipe dependence) in caregivers? The role of work fatigue, mental illness, spirituality, and religiosity. *Perspectives in Psychiatric Care*, 58(1): 383–394. <https://doi.org/10.1111/ppc.12804>
- Lee, K.-C., Yiin, J.-J., Lin, P.-C., & Lu, S.-H. (2015). Sleep disturbances and related factors among family caregivers of patients with advanced cancer. *Psycho-Oncology*, 24(12): 1632–

1638. <https://doi.org/10.1002/pon.3816>
- Martín-García, R., Martín-Ávila, G., De la Rubia-Marcos, M., Maroto-Rodríguez, R., Ortega-Angulo, C., Carreras-Rodríguez, M. T., Abad-Santos, F., & Cago-Veiga, A. B. (2016). Consumption of drugs and nonpharmacological therapies in caregivers of patients with Alzheimer's disease: A case-control study in Madrid. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders Extra*, 6(1): 68–77. <https://doi.org/10.1159/000442942>
- Martínez-Cortés, C., López-Lira, R., Padilla-Góngora, D., García-Goldsmith, M., Rodríguez-Martin, C. R., & Lucas-Acién, F. (2011). Sobrecarga del cuidador en familiares de pacientes con enfermedad de Alzheimer en estadios leve y moderado. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 4(1), 269–275. <https://www.redalyc.org/pdf/3498/349832331028.pdf>
- Moher et al.: Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews* 2015 4:1
- Moreno, T. A., & Bravo, S. M. (2014). Principios gestálticos aplicados al asesoramiento domiciliario del cuidador de enfermos de Alzheimer. *Revista Poiesis*, 27: 1–27. <https://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/poiesis/article/view/1248>
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (2018). Informe mundial sobre drogas. https://www.unodc.org/wdr2018/prelaunch/WDR18_ExSum_Spanish.pdf
- Pajares, B. M. (2012). Cansancio del rol del cuidador. *REDUCA (Enfermería, Fisioterapia y Podología)*, 4(1) <http://www.revistareduca.es/index.php/reduca-enfermeria/article/view/1015/1028>
- Peters, M., BHSc, MA., Godfrey, C., Khalil, H., McInerney, P., Parker, D., & Soares, C. B. (2015). Guidance for conducting systematic scoping reviews. *JBIM Evidence Implementation*, 13(3): 141–146. <https://doi.org/10.1097/XEB.0000000000000050>
- Pérez-Cruz, M., Parra-Anguita, L., López-Martínez, C., Moreno-Cámara, S., & Del-Pino-Casado, R. (2019). Coping and anxiety in caregivers of dependent older adult relatives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9): 1651. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091651>
- Pequeno, D. P., Viaro, E. G., Carron, J., Fernandes, M., Camargo, B., & Gomes, R. (2022). Influence of sociodemographic characteristics and inflammation-related gene variants on the comfort level of caregivers of patients with head and neck cancer. *Journal of Holistic Nursing*, 40(3): 227–237. <https://doi.org/10.1177/089801012111046738>
- Salgado-García, F. I., Zuber, J. K., Graney, M. J., Nichols, L. O., Martindale-Adams, J. L., & Andrasik, F. (2015). Smoking and smoking increase in caregivers of Alzheimer's patients. *The Gerontologist*, 55(5): 780–792. <https://doi.org/10.1093/geront/gnt149>
- Stacey, A. F., Gill, T. K., Price, K., & Taylor, A. W. (2019). Biomedical health profiles of unpaid family carers in an urban population in South Australia. *PLOS ONE*, 14(3): e0208434. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208434>
- Son, E. H., Wallen, G. R., Flynn, S., Yang, L., & Lee, L. J. (2023). Patterns of health-promoting behaviors and associated factors in family caregivers of people receiving cancer treatment: A latent class profile analysis. *Psycho-Oncology*, 32(7): 1038–1047. <https://doi.org/10.1002/pon.6145>
- Terassi, M., Bento, S. R., Rossetti, E. S., Pavarini, S. C. I., & Hortense, P. (2023). Influencia de la sobrecarga, el estrés y los síntomas depresivos en la salud de los cuidadores de personas mayores: Un estudio longitudinal. *Revista Anna Nery*, 27: e20220437. <https://doi.org/10.1590/2177-9465-EAN-2022-0437es>
- Uğurlu, Y. K., Doğan, D. A., Efil, S., & Çaka, H. Ç. (2024). Compassion, stress and coping strategies in family caregivers of patients with heart failure. *Geriatric Nursing*, 59: 357–361. <https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2024.07.019>

- Vargas Beltrán, M. (2023) Modelo explicativo de consumo de alcohol, tabaco y medicamentos no prescritos en cuidadores principales de personas con cáncer. Doctorado thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/26808>
- Varma, P., DePadilla, L., Czeisler, M. É., Rohan, E. A., Weaver, E. A., Quan, S. F., Howard, M. E., Clarke, K. E. N., McKnight-Eily, L. R., & Rajaratnam, S. M. W. (2024). Substance use and help seeking as coping behaviors among parents and unpaid caregivers of adults in the United States during the COVID-19 pandemic. *The American Journal of Drug and Alcohol Abuse*, 50(6): 851–863. <https://doi.org/10.1080/00952990.2024.2394970>
- Villarreal-Mata, J. L., Sánchez-Gómez, M., Navarro-Oliva, E. I. P., Bresó Esteve, E., & Sordia Hernández, L. H. (2020). Inteligencia emocional y estrés en adultos con y sin tratamiento contra la adicción al alcohol y drogas. *Journal Health NPEPS*, 5(2). <https://periodicos.unemat.br/index.php/jhnpeps/article/view/4825>
- Webber, K., Davies, A. N., Leach, C., & Bradley, A. (2020). Alcohol and drug use disorders in patients with cancer and caregivers: Effects on caregiver burden. *BMJ Supportive & Palliative Care*, 10(2): 242–247. <https://doi.org/10.1136/bmjspcare-2019-002127>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Crecimiento, rendimiento y calidad de chile habanero bajo condiciones de malla sombra de diferentes colores

Growth, yield and quality of habanero chili grown under shade nets of different colors

Ana María Castillo-González^{1*}, Eduardo Ortiz-Mendoza¹, Luis Alonso Valdez-Aguilar², Edilberto Avitia-García¹, María del Rosario García-Mateos¹, Ma. Carmen Ybarra-Moncada³

² ¹Instituto de Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. CP 56230.

²Departamento de Horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo. Coahuila. CP 25315.

³Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. CP 56230.

*Correspondencia: anasofiacasg@hotmail.com (Ana María Castillo-González)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1662>

Recibido: 17 de septiembre de 2024; Aceptado: 16 de diciembre de 2024

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Víctor Arturo González-Hernández

Resumen

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) destaca por su alto nivel de pungencia y alto contenido de compuestos antioxidantes. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de mallas de diferentes colores sobre el crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad de fruto, para determinar la mejor opción en un sistema de producción alternativo para chile habanero en invernadero. El cultivo se estableció en invernadero de cristal con un sistema hidropónico abierto. Se utilizaron semillas de chile habanero 'Mayan Ba'alché'. Los tratamientos consistieron en el uso de mallas de colores verde, beige, azul, negro y sin malla (testigo). Se evaluó el peso fresco y seco de la parte aérea, raíz y frutos, área foliar, peso específico, concentración de azúcares solubles totales y compuestos fenólicos en hoja; en frutos se determinó la concentración de compuestos fenólicos, flavonoides totales y capacidad antioxidante. Con la malla beige se incrementó en 22 % el peso seco de la parte aérea, en relación al testigo. Asimismo, el testigo presentó 37 % más peso seco de raíz y 25 % más peso específico de hoja que los tratamientos con malla de color. El área foliar fue superior a la del testigo

con todas las mallas. Con la malla beige se obtuvo 15 % más de fruto, 16 % más de peso fresco y 40 % más de flavonoides; por lo que, podría ser una alternativa de producción de chile habanero en invernadero.

Palabras clave: *Capsicum chinense*, capacidad antioxidante, flavonoides, fenoles, azúcares solubles totales.

Abstract

Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) outstands for its high level of pungency and high content of antioxidant compounds. The aim of this study was to evaluate the effect of nets of different colors on vegetative growth, yield, and fruit quality, in order to determine the best option for an alternative production system for habanero peppers under greenhouse. The crop was established in a glass greenhouse with an open hydroponic system. Seeds of the 'Mayan Ba'alché' habanero pepper were utilized. Treatments consisted on the use of green, beige, blue, and black nets, and without a net (control). The study assessed the fresh and dry weight of the aerial part, roots, and fruits, foliar area, specific weight, concentration of total soluble sugars and phenolic compounds in the leaves. The concentration of phenolic compounds, total flavonoids, and antioxidant capacity were determined in fruits. The use of the beige net resulted in a 22 % increase in the dry weight of the aerial part, as compared to the control. The control treatment presented a 37 % increase in dry root weight and a 25 % increase in specific leaf weight compared to the treatment with the colored nets. The foliar area of plants under all colored nets, was larger than the control. Fruits treated with the beige net yielded a 15 % increase in quantity, a 16 % increase in weight, and a 40 % increase in flavonoid content; therefore, it can be an alternative for production of habanero chili in greenhouse.

Keywords: *Capsicum chinense*, antioxidant capacity, flavonoids, phenols, total soluble sugars.

1. Introducción

Los chiles son cultivados ampliamente en el mundo y son altamente apreciados por su sabor como especia y valor nutricional (Heuvelink y Körner, 2001). Por la diversidad de condiciones agroclimáticas, en México existe una gran variedad de chiles, entre los cuales destaca el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), el cual es un producto hortícola de suma importancia para el país como producto de consumo nacional y de exportación a Estados Unidos y Canadá, principalmente (Latournerie *et al.*, 2002). Este chile es uno de los chiles más picantes que se conocen (Cázares-Sánchez *et al.*, 2005). En México la superficie cosechada es de 1,619 ha con una producción de 31,297.47 t en 2022; en donde destacan los estados de Sinaloa (8,734 t), Campeche (4,737 t), Yucatán (4,325 t), Tabasco (2,720 t), Veracruz (2,301 t), Quintana Roo (2,065 t), Chiapas (1,954 t) y Nayarit (1,011 t) (SIAP, 2023). El creciente mercado internacional para el chile habanero, ha incrementado la demanda por frutos más picantes y grandes (Carballo-Bautista *et al.*, 2010), por lo que es necesario buscar alternativas de producción que permitan satisfacer a los mercados nacionales y extranjeros.

Las mallas de color o fotoselectivas, representan un nuevo concepto tecnológico que tiene como objetivo combinar la protección física, junto con la filtración diferencial de la radiación solar, para promover respuestas fisiológicas deseadas que son reguladas por la luz (Shahak *et al.*, 2008). Las

mallas sombra se usan en numerosos cultivos hortícolas para protegerlos de la radiación solar excesiva, del viento, granizo y pájaros; además de disminuir las enfermedades virales transmitidas por aves e insectos; también tienen influencia en el crecimiento de las plantas por modificar las condiciones micro climáticas (Basile *et al.*, 2012). Los diferentes niveles de sombreo y de la calidad de la luz obtenidas con el uso de mallas de colores, pueden alterar la morfología y los procesos fisiológicos (tasa fotosintética) y bioquímicos, así como el contenido y tipo de metabolitos secundarios en las plantas (Mahmood *et al.*, 2018). Otros efectos benéficos de estas mallas son la obtención de mayor rendimiento y mejor calidad del fruto (Wallace *et al.*, 2012). Actualmente, las mallas pueden ser de color verde, blanco, rojo, azul, negro y gris y su uso está en aumento, por lo que es necesario definir el color de malla que permita obtener los mejores beneficios para cada cultivo. En el caso del chile habanero, el uso de esta tecnología es escasa y es necesario evaluar el impacto que tiene en su crecimiento, rendimiento y calidad del fruto, por lo que el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de mallas de diferentes colores (negro, beige, verde y azul) en el crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad del fruto.

2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en un invernadero de cristal, ubicado en Chapingo, Texcoco, Estado de México, entre las coordenadas 19° 20' latitud norte y 98° 53' longitud oeste a 2,240 m de altitud. Las plantas se obtuvieron a partir de semilla de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) 'Mayan Ba'alché', las cuales se sembraron en semilleros de 200 cavidades con sustrato formado por la mezcla de perlita y turba en proporción 1:1 v/v. Cuando las plántulas tuvieron de 4 a 5 hojas verdaderas, se trasplantaron a bolsas negras de 12 L de capacidad (una planta por bolsa), con tezontle rojo de partícula fina (3 a 4 mm) como sustrato. El cultivo se estableció en un sistema hidropónico abierto bajo invernadero. Las plantas se desarrollaron durante siete meses, bajo la cubierta de mallas sombra de colores: verde, azul, beige y negro de monofilamento con 80 % de sombreo, adquiridas en Prosagri S.A de C.V. Las mallas se colocaron sobre soportes de madera a una altura de 1.7 m, 1.2 m de ancho y 2.5 m de largo, cubriendo en su totalidad por los cuatro lados al cultivo.

Los riegos se hicieron diariamente de forma manual con la solución nutritiva de Steiner (1984); a partir del trasplante, los riegos se hicieron con la solución nutritiva al 30 % de su concentración por dos semanas; posteriormente, la concentración se aumentó al 50 % por otras dos semanas, después al 100 % por el resto del ciclo, con pH de 5.7 y CE de 2.3 dS m⁻¹ (Macías *et al.*, 2013). El volumen de riego diario de la solución fue de 400 mL, con drenaje aproximado del 30 %. Las temperaturas (° Celsius) máximas y mínimas promedio para cada malla (tratamiento) fueron: verde 31.6 y 9.0, beige 32.3 y 9.0, azul 32.13 y 9.0, negra 31.6 y 8.9, testigo (sin malla) 33.0 y 8.9. La humedad relativa (%) máxima y mínima fue: verde: 71.2 y 29.7, beige 70.5 y 28.9, azul 70.6 y 28.9, negra 71.0 y 29.1 y testigo 69.1 y 26.5. Los factores climatológicos mencionados se registraron con un datalogger Elitech® RC-51H (CA, EE.UU.) También se registró la cantidad de luz que recibieron las plantas bajo cada tratamiento, con un luxómetro Phytotronics, Inc. MO EE. UU. a las 12:30 del día en tres puntos del área del cultivo (en dos extremos y en el centro). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió en una planta.

Las variables evaluadas fueron: 1) Altura de planta, con un flexómetro desde la base del tallo hasta el ápice. 2) Diámetro de la base del tallo, con un vernier digital TRUPER® (México). 3) Peso fresco y seco de la parte aérea (tallo con hojas) y raíz, se registró con una balanza OHAUS® modelo Scout Pro

(New Jersey, EE. UU.), estas variables se registraron en cinco plantas por tratamiento. 4) Área foliar por hoja, se midió con un integrador de área foliar LICOR® 3100 (Lincoln, EE. UU.) y de las cinco plantas por tratamiento, se colectaron de 5 a 7 hojas de reciente maduración (hojas fuente). 5) Peso específico de hoja; se obtuvo dividiendo el peso seco por el área foliar de las hojas antes mencionadas. 6) Concentración de azúcares solubles totales en hoja, se determinó en cinco hojas de reciente maduración por planta; en las cinco repeticiones por tratamiento, se siguió el método de antrona descrito por Witham *et al.* (1971). Las lecturas se realizaron a 600 nm en un espectrofotómetro Thermo Spectronic GENESYS® 10 UV (New York, EE. UU.) con una curva patrón de 0 a 250 µg de glucosa mL⁻¹. 7) Concentración de pigmentos fotosintéticos, se determinó la concentración de clorofila a, b y carotenoides en cinco hojas de reciente maduración, de cinco repeticiones por tratamiento. Se siguió el método descrito por Witham *et al.* (1971), la absorbancia se leyó a 663, 645 y 470 nm en un espectrofotómetro Thermo Spectronic GENESYS® 10 UV (New York, EE. UU.). 8) Concentración de fenoles totales, se determinó en cinco hojas de reciente maduración (hojas fuente) por planta, de cinco repeticiones por tratamiento; se siguió el método descrito por Waterman y Mole (1994). 9) Número de frutos por planta, se cuantificaron los frutos de cada cosecha. 10) Peso fresco de fruto, se registró de todos los frutos por planta, con una balanza digital OHAUS® modelo Scout Pro (New Jersey, EE. UU.). 11) Concentración de flavonoides totales en fruto, se determinó en cinco frutos maduros por planta, en las cinco repeticiones por tratamiento con el método de Chang *et al.* (2002). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina por 100 g de peso fresco (mg EQ 100 g⁻¹ p. f.). 12) Concentración de fenoles totales en fruto, se determinó con el método de Waterman y Mole (1994), en cinco frutos maduros por planta. La concentración se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso fresco (mg EAG 100 g⁻¹ p. f.). 13) Capacidad antioxidante en fruto, se determinó en cinco frutos por planta; se determinó con el método FRAP descrito por Benzie y Strain (1996). El análisis estadístico de los datos consistió en análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), con el paquete estadístico SAS System versión 9 (SAS Institute inc., 2006).

3. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presenta la radiación en luxes, que se presentó bajo cada malla de color durante el ciclo del cultivo. El tratamiento testigo presentó la mayor radiación en promedio (1427 luxes), la malla verde fue la que limitó más el paso de luz (546.7 luxes).

Tabla 1. Radiación solar (luxes) promedio por mes y por tratamiento, durante el crecimiento de chile habanero cultivado en invernadero con malla sombra de diferentes colores.

Table 1. Average solar radiation (luxes) per month and per treatment, during growth of habanero chili grown in a greenhouse under shade nets of different colors.

Mes	Testigo	Malla beige	Malla negra	Malla azul	Malla verde
Julio	1434.4	924.4	795.9	1003.3	624.4
Agosto	1557.8	779.8	676.7	774.4	591.8
Septiembre	1410.0	716.2	627.9	770.3	606.2
Octubre	1378.4	943.1	800.5	969.9	481.2
Noviembre	1540.3	708.3	644.1	760.0	529.7
Diciembre	1311.8	641.7	549.9	689.4	467.4
Enero	1357.3	620.0	536.7	675.5	526.5

Promedio	1427.1	761.9	661.7	806.1	546.7
----------	--------	-------	-------	-------	-------

La altura de la planta disminuyó 12.2 cm y el diámetro 4.68 mm con la malla verde en relación al testigo sin malla; con las demás mallas las alturas fueron estadísticamente similares a la del testigo; mientras que con la malla beige se registró un diámetro estadísticamente similar al del testigo, aunque numéricamente inferior. El peso fresco de la parte aérea con la malla beige fue estadísticamente similar al del testigo; el menor peso (43 % menor que el de las plantas sin malla) se registró con la malla verde, esto puede deberse al menor crecimiento de las plantas bajo la malla verde (Tabla 2), por efecto de la menor temperatura y menor cantidad de luz recibida a través esta malla. El peso seco de la parte aérea con las mallas beige y azul fue similar estadísticamente al del testigo; los menores pesos (42 y 54 % menos que el del testigo) se obtuvieron con las mallas negra y verde (Tabla 2). El peso fresco de la raíz fue superior en las plantas sin malla y el menor peso lo tuvieron las raíces de las plantas con las mallas negra y verde; con esta última, la disminución fue del 82 % en relación al testigo. El peso seco del sistema radical fue mayor en las plantas sin malla, y nuevamente, los menores pesos se registraron con las mallas negra y verde; con esta última malla, el peso fue 87 % menor al del testigo (Tabla 2).

Tabla 2. Altura de planta, diámetro de la base del tallo, peso fresco (PFA) y seco (PSA) de la parte aérea y raíz (PFR, PSR) de plantas de chile habanero cultivadas en invernadero bajo malla sombra de diferentes colores.

Table 2. Plant height, diameter of the stem base, fresh (PFA) and dry (PSA) weight of the aerial part and root (PFR, PSR) of habanero chili plants grown in a greenhouse under shade nets of different colors.

Tratamiento color de malla	Altura planta (cm)	Diámetro tallo (mm)	PFA (g)	PSA (g)	PFR (g)	PSR (g)
Testigo	124.6 ab ^z	14.24 a	355.04 a	92.28 a	162.84 a	56.05 a
Beige	154.6 a	12.40 ab	421.12 a	112.24 a	125.36 b	34.98 b
Negra	144.2 a	10.41 bc	231.30 bc	52.56 b	33.78 d	10.29 c
Azul	133.2 ab	11.31 bc	342.26 ab	90.16 a	89.44 c	22.57 b
Verde	112.4 b	9.56 c	199.96 c	42.08 b	29.44 d	7.34 c

^zMedias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$).

A pesar de la mayor cantidad de luz recibida por las plantas sin malla (1,427 luxes, en promedio) (Tabla 1), que podría estresar a la planta, el crecimiento vegetativo no fue afectado. Entre las mallas, la beige con una cantidad intermedia de luz (762 luxes), fue la que favoreció un mejor crecimiento de las plantas, sin superar a los resultados del testigo. Las mallas fotoselectivas generan cambios en la calidad y cantidad de la luz transmitida (Basile *et al.*, 2012) y ocasionan diversas respuestas fisiológicas y morfológicas en las plantas; estos cambios en la luz son percibidos por fotorreceptores como clorofilas, carotenoides, fitocromos (rojo y rojo lejano), criptocromos y fototropinas (Duduzile-Buthelezi *et al.*, 2016). Dentro de las respuestas morfológicas se ha observado la elongación celular de los pecíolos, con reducción del grosor de la pared celular, como se observó en *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. (Sasidharan *et al.*, 2010). La elongación de los tallos, con entrenudos más largos se observó en arándano azul (*Vaccinium corymbosum* L.) bajo malla negra, que superó al efecto de las mallas blanca, gris y roja (Retamales *et al.*, 2008). Los resultados del presente estudio con chile habanero, no coinciden con lo reportado por estos autores, dado que con las mallas verde y negra se registró el menor crecimiento; sin embargo, coinciden con los observados en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*

Brot.) var. Tecozautla, en donde con la malla beige se incrementó la altura y diámetro del tallo (Morales *et al.*, 2018); este efecto también se observó en plantas jóvenes injertadas de naranjo [injertos de naranjo dulce (*Citrus sinensis* (L.) Osb). var Valencia sobre portainjertos de naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.)], pero con mallas roja, perla y amarilla (Zhou *et al.*, 2018). El alargamiento celular con reducción en el grosor de la pared celular (Sasidharan *et al.*, 2010) inducido por el sombreado, comprende una red compleja de regulación transcripcional a nivel de proteínas reguladas por fotorreceptores que involucran factores de transcripción básicos, en donde se incluyen genes que codifican para la síntesis de hormonas como auxinas, ácido giberélico y brasinoesteroides que promueven el crecimiento de los tallos (Casal, 2013).

El área foliar de las hojas de reciente maduración (hojas fuente), fue similar estadísticamente en todas las mallas (Tabla 3). La mayor área foliar se presentó con la malla verde (135.13 cm²), 70.8 % superior al testigo; mientras que el peso específico de las hojas fue mayor en el testigo (con 3.75 mg cm²), valor estadísticamente igual al de la malla beige; y estadísticamente diferente a los de los otros tratamientos (Tabla 3). La sombra generada con las mallas de colores promovió cambios morfológicos en las hojas del chile habanero, como mayor tamaño de la lámina foliar pero más delgadas, lo que puede relacionarse con el menor peso específico observado en esta investigación. Esto coincide con lo indicado por Taiz *et al.* (2015) quienes observaron que las hojas bajo sombra son más delgadas que las que están directamente iluminadas por el sol. Las hojas sombreadas tienen cutícula más delgada, menos parénquima esponjoso y una sola capa de parénquima en empalizada (Crang *et al.*, 2018). Estos cambios podrían ser una respuesta de adaptación a la cantidad y calidad de la luz en el ambiente de crecimiento de las plantas. Las hojas con la malla beige y negra presentaron las mayores concentraciones de azúcares solubles totales (AST), pero similares estadísticamente a la concentración de las hojas sin malla (Tabla 3). Esto podría indicar que, aunque las hojas bajo las mallas eran más grandes y delgadas que las del testigo, su capacidad fotosintética no se afectó por la cantidad de luz (luxes) recibida, por lo que presentaron azúcares que pueden translocarse a los puntos demandantes. Este fenómeno se observó en plantas jóvenes de naranja que crecieron bajo mallas rojas, perla y amarillas, en donde se incrementó la fotosíntesis y crecimiento vegetativo de los árboles (Zhou *et al.*, 2018). Las hojas bajo sombra presentan mayor concentración de clorofila total y mayor proporción de clorofila b; en el caso del presente estudio los pigmentos fotosintéticos como clorofilas a, b y carotenoides, no mostraron diferencias estadísticas entre los tratamientos (datos no mostrados). Algunas especies tienen una respuesta adaptativa al sombreado de las hojas, que consiste en producir una mayor proporción de centros de reacción del PII que del PI, comparadas con hojas bajo el sol, lo que garantiza la absorción de luz y transferencia de energía en la fotosíntesis (Taiz *et al.*, 2015).

La concentración de fenoles totales en la hoja fue mayor en las hojas de la malla beige y del testigo; con las demás mallas las concentraciones fueron estadísticamente similares; no obstante, la concentración con la malla negra fue 77 % menor a la de las hojas sin malla y 82 % menor a las de la malla beige (Tabla 3). Estos resultados no coinciden con lo observado en cilantro (*Coriandrum sativum* L.), en donde con la malla negra se incrementaron los fenoles totales, los flavonoides, la actividad antioxidante y el ácido ascórbico en las hojas, lo que mejoró las características comerciales de la planta (Buthelezi *et al.*, 2016). Los compuestos fenólicos son antioxidantes producidos para combatir el efecto de las radiaciones nocivas de la luz solar (Ilic *et al.*, 2012), lo que indica que las plantas de chile habanero sin malla y con la malla beige estuvieron bajo estrés lumínico durante su crecimiento, lo que influyó en la concentración fenólica.

Tabla 3. Área foliar, peso específico de hoja, concentración de azúcares solubles totales (AST) y fenoles en hojas de chile habanero cultivado en invernadero bajo malla sombra de diferentes colores.

Table 3. Foliar area, leaf specific weight, concentration of total soluble sugars (AST), and phenolic compounds in the leaves of habanero chili plants grown in a greenhouse under shade nets of different colors.

Tratamiento color de malla	Área foliar (cm ²)	Peso específico hoja (mg cm ⁻²)	AST (mg g ⁻¹ de p.f.)	Fenoles totales mg EAG 100 g ⁻¹
Testigo	79.09 b ^z	3.75 a	9.81 ab	249.90 a
Beige	114.71 a	2.96 ab	11.23 a	317.22 a
Negra	132.04 a	2.12 b	11.32 a	56.69 c
Azul	101.66 ab	2.81 b	10.23 ab	66.22 bc
Verde	135.13 a	2.06 b	7.78 b	93.97 bc

^zMedias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey, P≤0.05).

El número de frutos por planta con la malla beige fue mayor y estadísticamente similar al del testigo; con las mallas negra y verde se registró una considerable disminución del 97 y 91 % en relación al testigo; en cambio, el mayor peso, longitud y diámetro del fruto se obtuvo con la malla negra y el menor con el testigo (Tabla 4). Las concentraciones de fenoles totales en el fruto fueron similares estadísticamente en el testigo y mallas beige, negra y azul. La concentración de flavonoides más baja se presentó en los frutos de las plantas sin malla y la más alta, cerca de tres veces mayor en los frutos con la malla negra. La mayor capacidad antioxidante la presentaron los frutos del tratamiento testigo y la menor la de los frutos producidos bajo malla azul y verde (Tabla 4).

Tabla 4. Características físicas del fruto y concentración de fenoles (mg EAG 100 g⁻¹), flavonoides (mg EQ 100 g⁻¹) y capacidad antioxidante (FRAP, µM ET 100 g⁻¹) en chile habanero cultivado en invernadero bajo malla sombra de diferentes colores.

Table 4. Physical characteristics of the fruit and concentration of phenols (mg EAG 100 g⁻¹), flavonoids (mg EQ 100 g⁻¹) and antioxidant capacity (FRAP, µM ET 100 g⁻¹) in habanero chili grown in a greenhouse under shade nets of different colors.

Tratamiento color de malla	Peso (g)	NF planta ⁻¹	LONGF (mm)	DIAF (mm)	FEN	FLAV	CPANT
Testigo	3.40 c ^z	58 a	22.00 c	20.10 c	78.45 a	16.04 d	1678.1 a
Beige	3.93 bc	67 a	28.65 b	22.67 bc	78.04 a	22.32 c	1047.6 bc
Negra	5.98 a	2 c	33.05 a	28.35 a	83.97 a	43.08 a	1246.8 b
Azul	4.36 abc	24 b	27.91 b	24.38 b	82.17 a	29.40 b	811.5 c
Verde	5.06 ab	6 c	30.99 ab	25.72 ab	58.95 b	26.61 b	944.9 c

^zMedias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey, P≤0.05). NF: número de frutos por planta; LONGF: longitud del fruto; DIAF: diámetro del fruto; FEN: fenoles; FLAV: flavonoides; CPANT: capacidad antioxidante.

De acuerdo con Shahak *et al.* (2008), algunas respuestas de la planta a la luz incluyen tiempo de cosecha, cuajado, rendimiento, tamaño y color de la fruta, así como la calidad interna y externa del

fruto. En esta investigación, el reducido número de frutos producidos bajo las mallas negra y verde, puede deberse al retraso de la floración que se observó con estas mallas a los siete meses, que fue el tiempo que duró el experimento. Sin embargo, los frutos producidos bajo estas dos mallas fueron más grandes y pesados (Tabla 4) que los de la malla beige y el testigo. Por otro lado, en kiwi [*Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang y A.R. Ferguson] cultivado con las mallas blanca y roja, los frutos acumularon más peso, y con la roja los frutos fueron los de mayor tamaño (Basile *et al.*, 2012). Las mallas fotoselectivas de color perla mejoraron la calidad de la fruta, el tamaño y masa de fruto en tres cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Tinyane y Sivakumar, 2013). En arándano azul (*Vaccinium corymbosum* L.), el rendimiento se incrementó 95 % con malla blanca, con la negra se tuvo el más bajo valor con respecto al testigo (Retamales *et al.*, 2008), como se observó en el presente estudio con chile habanero. Pero, en arándano azul 'Elñiott' bajo malla blanca y roja, la cosecha se retrasó de 5 a 7 días, sin detrimento en la calidad del fruto (Lobos *et al.*, 2013). En kiwi cv. Hayward cultivado con mallas blanca, roja, azul y verde disminuyó la concentración de polifenoles y la actividad antioxidante del fruto a cosechar (Basile *et al.*, 2012).

Sin embargo, en el presente estudio, se observó lo contrario, sólo con la malla verde se tuvo disminución en los fenoles totales del fruto; los flavonoides se incrementaron con las mallas en comparación con el testigo, donde la negra promovió la mayor concentración; sin embargo, la capacidad antioxidante fue mayor en los frutos obtenidos sin malla (Tabla 4). La concentración de estos metabolitos es mayor en condiciones de estrés, por lo que contribuyen a una mayor actividad antioxidante, en comparación con los compuestos fenólicos presentes en tejidos vegetales no estresados (Heredia y Cisneros, 2009). En el caso del presente estudio con chile habanero, la mayor capacidad antioxidante de los frutos obtenidos sin malla y con la malla beige, pudo deberse al estrés ocasionado por la alta cantidad de luz recibida (Tabla 1); en cambio con la malla negra, el alto valor se debió al estrés ocasionado por el fuerte sombreo que recibieron las plantas.

4. Conclusiones

El color y el porcentaje de sombreo de las mallas influyeron significativamente en la transmisión de la radiación solar, lo que afectó el crecimiento, la fisiología, la producción de metabolitos secundarios, el rendimiento y la calidad del fruto de las plantas de chile habanero cultivadas en invernadero. El testigo sin malla, recibió la mayor radiación durante los siete meses que duró el estudio, mientras que la malla verde recibió la menor cantidad. La malla beige mejoró el crecimiento de las plantas, la concentración de azúcares en las hojas, el rendimiento y la capacidad antioxidante del fruto, lo que la convierte en una opción prometedora para la producción de chile habanero en invernadero.

Contribuciones de los autores

A.M.C.G. y **L.A.V.A.:** idea, dirección, ejecución y seguimiento del experimento; **E.O.M.:** estudiante del posgrado quien realizó la investigación; **E.A.G.:** establecimiento y manejo del cultivo en el invernadero; **M.R.G.M.:** realización de los análisis fitoquímicos; **M.C.Y.M.:** realización de los análisis estadísticos. Todos los autores revisaron el documento resultante de esta investigación y formaron parte del Comité Asesor del estudiante.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses para la publicación de este artículo.

5. Referencias

- Basile, B., Giaccone, M., Cirillo, C., Ritieni, A., Graziani, G., Shahak, Y., & Forlani, M. (2012). Photo-selective hail nets affect fruit size and quality in Hayward kiwifruit. *Scientia Horticulturae* 141: 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.04.022>
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry Journal* 239(1): 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Buthelezi, M. N. D., Soundy, P., Jifon, J., & Sivakumar, D. (2016). Spectral quality of photo-selective nets improves phytochemicals and aroma volatiles in coriander leaves (*Coriandrum sativum* L.) after postharvest storage. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 161: 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.05.032>
- Carballo-Bautista, M. A., Moguel-Salazar, F., Brito-Argáez, L., Cristóbal-Alejo, J., & Islas-Flores, I. (2010). Breve descripción morfológica de un pequeño fruto interno que crece en el fruto principal del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Revista Fitotecnica Mexicana* 33(4): 281-285. <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.4.281>
- Casal, J. J. (2013). Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annual Review of Plant Biology* 64: 403-427. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120221>
- Cázares-Sánchez, E., Ramírez-Vallejo, P., Castillo-González, F., Soto-Hernández, R. M., Rodríguez-González, M. T., & Chávez-Servia, J. L. (2005). Capsaicinoides y preferencia de uso en diferentes morfotipos de chile (*Capsicum annum* L.) del centro-oriente de Yucatán. *Agrociencia* 39(6): 627-638. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239606>
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis* 10(3): 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Crang, R., Lyons-Sobaski, S., & Wise, R. (Eds.). (2018). *Plant Anatomy A Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77315-5>
- Duduzile, B. M. N., Soundy, P., Jifon, J., & Sivakumar, D. (2016). Spectral quality of photo-selective nets improves phytochemicals and aroma volatiles in coriander leaves (*Coriandrum sativum* L.) after postharvest storage. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 161: 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.05.032>
- Heredia, J. B., & Cisneros-Zevallos, L. (2009). The effects of exogenous ethylene and methyl jasmonate on the accumulation of phenolic antioxidants in selected whole and wounded fresh produce. *Food Chemistry* 115(4): 1500-1508. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.078>

- Heuvelink, E., & Körner, O. (2001). Parthenocarpic fruit growth reduces yield fluctuation and blossom end rot in sweet pepper. *Annals of Botany* 88(1): 69-74. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1427>
- Ilić, Z.S., Milenković, L., Stanojević, L., Cvetković, D., & Fallik, E. (2012). Effects of the modification of light intensity by color shade nets on yield and quality of tomato fruits. *Sci. Hort.* 139: 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.03.009>
- Latournerie, L., Chávez, J. L., Pérez, M., Castañón, G., Rodríguez, S. A., Arias, L. M., & Ramírez, P. (2002). Valoración *in situ* de la diversidad morfológica de chiles (*Capsicum annum* L. y *Capsicum chinense* Jacq.) en Yaxcabá, Yucatán. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(1): 25-33. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/1342>
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J. F., Flore, J. A., Romero-Bravo, S., & del Pozo, A. (2013). Productivity and fruit quality of *Vaccinium corymbosum* cv. Elliott under photo-selective shading nets. *Scientia Horticulturae* 153: 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.012>
- Macías-Rodríguez, H., Muñoz-Villalobos, J. A., Velásquez-Valle, M. A., Potisek-Talavera, M. C., & Villa-Castorena, M. M. (2013). Chile habanero: Descripción de su cultivo en la Península de Yucatán. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 12 (2): 37-43. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545057001>
- Mahmood, A., Hu, Y., Tanny, J., & Asante, E. A. (2018). Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: A review of recent advances. *Scientia Horticulturae* 241: 241-251. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.078>
- Morales, I., Martínez-Gutiérrez, G. A., Escamirosa-Tinoco, C., Nájera, C., da Cunha-Chiamolera, T. P. L., & Urrestarazu, M. (2018). Production and Quality of *Physalis ixocarpa* Brot. Fruit under Colored Shade Netting. *HortScience* 53(6): 823-828. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13100-18>
- Retamales, J. B., Montecino, J. M., Lobos, G. A., & Rojas, L. A. (2008). Colored shading nets increase yields and profitability of highbush blueberries. XXVII International Horticultural Congress - IHC2006: International Symposium on Cultivation and Utilization of Asian, Sub-tropical, and Underutilized Horticultural Crops. *Acta Horticulturae* 770: 193-198. https://www.actahort.org/books/770/770_22.htm
- SAS Institute inc. (2006). Base SAS 9.1.3 Procedures Guide. 2ª edition. Volumes 1, 2, 3 y 4. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sasidharan, R., Chinnappa, C. C., Staal, M., Elzenga, J. T., Yokoyama, R., Nishitani, K., Voesenek, L. A., & Pierik, R. (2010). Light quality-mediated petiole elongation in *Arabidopsis* during shade avoidance involves cell wall modification by xyloglucan endotransglucosylase/hydrolases. *Plant Physiology* 154(2): 978-990. <https://doi.org/10.1104/pp.110.162057>
- Shahak, Y., Ratner, K., Giller, Y. E., Zur, N., Or, E., Gussakovsky, E. E., Stern, R., Sarig, P., Raban, E., Harcavi, E., Doron, I., & Greenblat-Avron, Y. (2008). Improving solar energy utilization, productivity and fruit quality in orchards and vineyards by photosensitive netting. XXVII International Horticultural Congress - IHC2006: International Symposium on Enhancing Economic and Environmental Sustainability of Fruit Production in a Global Economy. *Acta Horticulturae* 772: 65-72. https://www.actahort.org/books/772/772_7.htm

- SIAP. (2023). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. *In*: Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. International Society for Soilless Culture. pp. 633-650. CABI Record Number: 19851996315.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (Eds.). (2015). Plant Physiology and Development. Sixth Ed. Sinauer Associates, Sunderland, CT. Inc. •Publishers.
- Tinyane, P. P., Sivakumar, D., & Soundy, P. (2013). Influence of photo-selective netting on fruit quality parameters and bioactive compounds in selected tomato cultivars. *Scientia Horticulturae* 161: 340-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.024>
- Wallace, R.W., Wszelaki, A. L., Miles, C. A., Cowan, J. S., Martin, J., Roozen, J., Gundersen, B., & Inglis, D. A. (2012). Lettuce yield and quality when grown in high tunnel and open-field production systems under three diverse climates. *HortTechnology* 22(5): 659–668. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.22.5.659>
- Waterman, P. G., & Mole, S. (Eds.). (1994). Analysis of Phenolic Plant Metabolites. Methods in Ecology. Black Well Scientific Publications, Oxford, 73-99.
- Witham, F. H., Blaydes, D. F., & Devlin, R. M. (Eds.). (1971). Experiments in Plant Physiology. Van Nostrand Reinhold Company. New York, 245.
- Zhou, K., Jerszurki, D., Sadka, A., Shlizerman, L., Rachmilevitch, S., & Ephrath, J. (2018). Effects of photoselective netting on root growth and development of young grafted orange trees under semi-arid climate. *Scientia Horticulturae* 238: 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.054>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Variation of the seed and foliar phenolic contents of five wild forms of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)

Variación del contenido fenólico foliar y de semillas de cinco formas silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)

Shaila Nayeli Pérez-Salinas¹, Rene Torres-Ricario¹, Nancy Nohemí Rodarte-Rodríguez ¹,
Heberto Iván Salas-Ayala¹, Liliana Wallander-Compeán^{1*}

¹ Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Unidad Durango, Av. Sigma 119, Fraccionamiento 20 de
noviembre II, Durango, Durango. C.P.34220.

*Correspondencia: lwallanderc@ipn.mx (Liliana Wallander-Compeán)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1691>

Recibido: 08 de octubre de 2024; Aceptado: 20 de enero de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Dra. Yolanda Salinas-Moreno

Abstract

The objective of the present study was to evaluate the seed and foliar phenolic composition from populations of wild *Phaseolus vulgaris* of Durango, Mexico. Seeds and leaves extracts were analyzed by HPLC-DAD, and UV-visible spectrophotometry. Analysis of variance were used to determine the capacity of the phenolic contents to discriminate between samples, the data were submitted to principal component analysis (PCA) and cluster analysis. The population with the highest content of phenolic compounds in both seed and leaves was the wild population of Nuevo Ideal and those that accumulated the lowest content of these compounds were Nombre de Dios and Canatlán. A total of 37 phenolic compounds in both seed and leaves from wild common bean were identified by HPLC-DAD. Wild species are important for the conservation of biodiversity, and for the genetic improvement of new varieties. Likewise, they could be used as forage, food or medicine, due to the high content of phytochemicals in seeds and leaf tissue, therefore, the information generated is relevant to knowledge about the characterization and diversity of wild *Phaseolus* species.

Keywords: phytochemicals, wild forms, spectroscopy, *Phaseolus vulgaris*, HPLC-DAD, phenolic composition.

Resumen

El objetivo del presente estudio fue evaluar la composición fenólica de hojas y de semillas de poblaciones silvestres de *Phaseolus vulgaris* de Durango, México. Los extractos de semillas y hojas se prepararon y analizaron mediante HPLC-DAD y espectrofotometría UV-visible. Se utilizó análisis de varianza para determinar la capacidad de los contenidos fenólicos para discriminar entre muestras. Los datos se sometieron a análisis de componentes principales (PCA) y análisis de agrupamiento. La población con mayor contenido de compuestos fenólicos tanto en semilla como en hoja es la población silvestre de Nuevo Ideal y las que acumularon menor contenido de estos compuestos fueron Nombre de Dios y Canatlán. Mediante HPLC-DAD se identificaron un total de 37 compuestos fenólicos tanto en semilla como en hojas de frijol común silvestre. Las especies silvestres son importantes para la conservación de la biodiversidad, y para el mejoramiento genético. Asimismo, podrían usarse como forraje, alimento o medicina, debido al alto contenido de fitoquímicos en tejido foliar y semillas. Por lo tanto, la información generada es relevante para el conocimiento sobre la caracterización y diversidad de especies silvestres de *Phaseolus*.

Palabras clave: fitoquímicos, formas silvestres, espectroscopia, *Phaseolus vulgaris*, HPLC-DAD, composición fenólica.

1. Introduction

Legumes are important sources of nutrients and bioactive compounds. Depending on the genotype, bean seeds also contain a wide variety of polyphenolic compounds, which have prospective health benefits. These may include flavonoids such as anthocyanins, flavonoids, proanthocyanidins, and tannins, as well as a wide range of phenolic acids (Ganesan and Xu, 2017; Yang *et al.*, 2018). Phenolic compounds contribute to the taste, smell and color of foods, and their bioactive role as antioxidants is associated with the prevention of cardiovascular and neurodegenerative diseases, diabetes, and cancer (Bhuyan and Basu, 2017).

The analysis of the foliar phenolic composition of common bean has received less attention than that of seeds, probably because humans do not consume the leaves. However, as leaves of common bean are used as forage for livestock, it is important to determine their phenolic composition because phenolics have nutraceutical properties (Mueller *et al.*, 2019). This may improve not just animal health, but the meat quality could be enhanced, and even organic waste improves soil structure.

All the previous studies worked just with domesticated beans and were focused on plant phenolic contents. These reports registered a variation according to changes in the environmental growth conditions (Del Valle *et al.*, 2015), plant age (Bystricka *et al.*, 2014), and genotypes (Yusnawan *et al.*, 2018). The state of Durango has physiographic and climatic diversity, due to this diversity wild species of common bean develop with variable phenotypes. In the last ten years the state has occupied the second place with the highest production of this legume at the national level. Wild species represent important information for the improvement and development of new varieties, so it is necessary to protect and conserve this plant genetic resource.

Hence, it is important to determine the seed and foliar phenolic contents among varieties and wild forms of common bean growing in different environmental conditions. There are few reports on the variation in foliar phenolic content of domesticated common bean (Reyes *et al.*, 2014). The leaf tissue

and seeds come from different municipalities with different altitudes, El Mezquital located at a low elevation, Súchil and Nombre de Dios at mid elevation, and Canatlán and Nuevo Ideal at high elevations. In Mexico there are few previous reports on the phenolic contents of wild forms of *P. vulgaris*. The objective of this study was to determine and compare the phenolic content of seeds and leaf tissue of five wild forms of common bean from Durango, Mexico.

2. Materials and methods

2.1 Materials

2.1.1 Plant Materials

Seeds (Fig. 1) and leaves of five wild forms of common bean were collected from their natural populations in Durango, Mexico (Table 1) during september - december 2019. The leaves and seeds were dried in a botanical drier at 40 °C to constant weight, ground in a domestic blender, and stored in paper bags in dark at room temperature.

Table 1. Collection data for five wild common beans (*Phaseolus vulgaris*) from Durango, Mexico.

Tabla 1. Datos de recolección de cinco frijoles silvestres (*Phaseolus vulgaris*) de Durango, México.

Localities	Latitude N	Longitude W	Altitude (m)	Weather	Tmax/Tmin* (°C)
El Mezquital	23° 26' 48.1''	104° 21' 49.5''	1400	Temperate subhumid	42.4/-0.2
Súchil	23° 39' 24.7''	104° 02' 20.9''	1963	Temperate	35.7/-6.4
Nombre de Dios	24° 04' 71''	104° 14' 23''	1877	Temperate	36.7/-3.5
Canatlán	24° 51' 03.4''	104° 51' 44.8''	2039	Semicold	35.1/-7.3
Nuevo Ideal	24° 45' 11.9''	105° 00' 05.6''	2037	Temperate	36.2/-5.0

*Data obtained from CONAGUA (2019).



Figure 1. Localities provenance and pictures of the seeds of five populations of wild common beans (*Phaseolus vulgaris*) from Durango, Mexico.

Figura 1. Localidades de procedencia y fotografías del grano de cinco poblaciones de frijol común silvestre (*Phaseolus vulgaris*) de Durango, México.

2.2 Methods

2.2.1 Preparation of extracts

Phenolic extracts were prepared according to Kim and Lee (2002). One gram of dry ground samples was macerated in 10 mL of 80 % methanol (v/v) for 24 hours, in the dark at room temperature. The extracts were centrifuged at 1,013 g, in a BOECO centrifuge U-32R, 230-240V, 50/60 Hz, for ten minutes at room temperature and the supernatants were separated. The pellets were reextracted and macerated in 10 mL of 20 % methanol (v/v) for one hour and centrifuged under the same conditions. Both solvents from the same sample were combined and formed the total extract, which was concentrated to dryness (by evaporation) and resuspended in 80 % methanol. For the HPLC-DAD analysis of both foliar and seed samples, total extracts were concentrated to dryness (by evaporation), and dissolved in 3 mL of methanol; these were the phenolic enriched extracts.

2.2.2 Spectrometric analysis of Phenolic compounds

The equipment used was the Multiskan Go spectrophotometer; high-quality monochromatorbased UV/VIS spectrophotometer. It is used in spectral scanning, endpoint and kinetic analysis. It measures absorbance in the 200–1000 nm wavelength range and it appropriate to 96- or 384-well plates.

Total Phenolic content (TPC)

The total phenolic concentrations were determined according to Falleh *et al.* (2011), from a standard curve constructed with six concentrations of gallic acid ($\text{Abs } 760\text{nm} = 4.4875 [\text{gallic acid}] + 0.0368$, correlation coefficient $r = 0.9946$). Total phenolics concentrations were expressed as milligrams of gallic acid equivalents per gram of dry weight (mg GAE / 100 g DW).

Flavonoid contents (FC)

The flavonoid contents were determined according to Lauranson and LebGreton (1993), from a standard curve constructed with six concentrations of quercetin ($\text{Abs } 420 \text{ nm} = 6.7545 [\text{quercetin}] + 0.081$, correlation coefficient $r = 0.997$). Flavonoid contents were expressed as milligrams of quercetin equivalents per 100 grams of dry weight (mg QE / 100 g DW).

Total condensed tannins (TCT)

The contents of condensed tannins were determined according to Julkunen (1985), from a standard curve constructed with seven concentrations of epicatechin ($\text{Abs } 510 \text{ nm} = 0.0113$

[epicatechin] – 0.0055 $r = 0.9982$). The contents were expressed as milligrams of epicatechin equivalents per gram of dry weight (mg EC / 100 g DW).

Anthocyanins (AC)

As reference, Monomeric anthocyanins were determined with the differential pH method described by Giusti and Wrolstad (2001), Abs 510 nm y Abs 700 nm using the molecular weight (449.2) and the molar absorption (26.900) of cyanidin-3-O-glucoside as reference. The values were expressed as milligrams of cyanidin-3-O-glucoside per dry extract (mg C3OG / 100 g DE).

2.3 HPLC-DAD analysis

Aliquots (100 μ L) of foliar and seeds phenolic enriched extracts (50 mg/mL) were analyzed in a Perkin Elmer® Flexar™ PDA Plus™ detector, according to the gradient method reported by da Graça and Markham (2007). Chromatographic conditions: Mobile phase: A: acidified water (phosphoric acid) y B: acetonitrile, 20 μ L of sample was injected, with a flow of 0.8 μ L/min. Column: Brownlee™ SPP C18, 100 x 2.1 mm, 2.7 μ m at 45 °C. Chromatograms were registered at 265 and 340 nm. Spectral data of all picks were recorded between 200 and 400 nm using diode array detection (DAD).

2.4 Experimental design and data analysis

The data of phenolic contents were subjected to an analysis of variance ($p \leq 0.05$) and means were compared with the Tukey test. To determine the capacity of the phenolic contents to discriminate between samples, the data were submitted to principal component analysis (PCA) and cluster analysis, XLSTAT v 2021.2.2 (Addinsoft 2024).

3. Results and discussion

3.1 Spectrometric analysis of phenolic compounds

3.1.1 Phenolic compounds in seeds

The seeds accumulated different pigments in the coat (Fig. 1). In common bean seeds, pigments are predominantly phenolics (Capistrán *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2021). The coloration of the common bean seed is related to the P (pigment) gene and, in the case of the white coloration in the coat seed, it is due to a recessive phenotype of all the races that have been domesticated of this species along its history. Moreover, the same pigmentation of the seed has been used as a quantitative trait genetic marker (McClean *et al.*, 2018).

Total Phenolic content

Significant variations were found in the content of secondary metabolites in seeds (Table 2). The locality of Nuevo Ideal found higher TPC (269.9 mg GAE/ 100 g DW), and El Mezquital TPC 173.67 mg GAE / 100 g DW, in the locality Nombre de Dios the lowest amount was found of (133.39 mg GAE / 100 g DW). The main beneficial health effect of phenolics is their antioxidant activity (Khang *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2017; Carbas *et al.*, 2020), have reported values of total phenolics in common beans of 117 mg EAG/100 g to 440 mg EAG/100 g.

Flavonoid contents

The bean populations that presented the highest content of flavonoids was from the locality of Nuevo Ideal (77.66 mg QE / 100 g DW) and the lowest amount was found in the town of El Mezquital (50.33 mg QE / 100 g DW). Previous studies have reported that black bean varieties are characterized by having the highest flavonoid values compared to light varieties (Armendáriz *et al.*, 2019). The nutraceutical properties attributed to the bean have been mainly related to this type of bioactive compounds. The seeds from the locality of Nuevo Ideal is a variegated seed with dark colors, between black and grey. It has been reported that anthocyanins are responsible for the red, black and red pigmentation, blue in bean grains, these pigments are generally located in the seed coat of the grain (Dzomba *et al.*, 2013; Harlen and Jati, 2018). According to Heredia (2017), the consumption of common beans has adequate concentrations of flavonoids, in addition, when compared with other legumes (Chickpea 124.59 µg QE / g DW, lentils 17.13 µg QE / g DW) it has a greater amount of this element. Likewise, when grain consumption is complete, there is a considerable biological effect of flavonoids in legumes, showing anticancer and anti-inflammatory properties (Maleki *et al.*, 2019). Within the group of flavonoids, anthocyanins are the most important type, which are found in pigmented beans and are responsible for the antioxidant capacity.

Total condensed tannins

The concentration of tannins in the wild common bean populations evaluated showed values in a range of 51.35 mg EC / 100 g DW to 75.17 mg ECE / 100 g DW. Tannins are compounds that can have a beneficial or adverse nutritional effect and are the predominant phenolic compounds in legumes. These can interact with macronutrients, especially with proteins (Zhang *et al.*, 2014).

Anthocyanins

The wild forms of common bean studied showed anthocyanin concentrations in a range from 0.38 mg C3OG / 100 g DW to 3.12 mg C3OG / 100 g DE. The highest content of anthocyanins was found in the seeds from El Mezquital (3.120 mg C3OG / 100 g) and Nuevo Ideal (1.73 mg C3OG / 100 g), seeds with dark colors in the case of those from El Mezquital and those from New Ideal with marbled colour. Dark coloured beans are considered a good source of anthocyanins. (Mojica *et al.*, 2017; Harlen 2018).

Table 2. Contents of total phenolics, flavonoids, condensed tannins, and anthocyanins of seeds of five wild forms of common bean (*Phaseolus vulgaris*) from Durango, Mexico.

Tabla 2. Contenidos de fenoles totales, flavonoides, taninos condensados y antocianinas de semillas de cinco formas silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) de Durango, México.

Localities	Total phenolics ¹	Flavonoids ²	Condensed tannins ³	Anthocyanins ⁴
El Mezquital	173.67 ± 10.39 ^b	50.33 ± 6.81 ^b	74.30 ± 1.27 ^a	3.12 ± 0.11 ^a
Súchil	160.74 ± 7.50 ^c	69.81 ± 5.75 ^{ab}	71.58 ± 3.33 ^{ab}	1.14 ± 0.41 ^c
Nombre de Dios	133.39 ± 5.64 ^c	76.56 ± 6.32 ^a	68.69 ± 1.40 ^b	0.85 ± 0.11 ^c
Canatlán	154.20 ± 1.63 ^c	55.80 ± 9.27 ^{ab}	51.35 ± 1.93 ^c	0.38 ± 0.10 ^d
Nuevo Ideal	269.90 ± 2.95 ^a	77.66 ± 8.58 ^a	75.17 ± 0.66 ^a	1.73 ± 0.18 ^b
Pr > F(Model)	0.014	0.048	<0.0001	<0.0001
Significant	Yes	Yes	Yes	Yes

¹: Expressed in mg GAE / 100 g DW, ²: mg QE / 100 g DW, ³: mg EC / 100 g DW, ⁴: mg C3OG / 100 g DW. Different uppercase letters indicate significant differences between five populations ($p \leq 0.05$) (Fisher's test), media ± SD, n = 3.

In this study, the seeds with the highest pigmentation (dark colors) were those from Nuevo Ideal and El Mezquital, likely contain a diverse range of beneficial phenolic compounds, contributing to their higher antioxidant activity, followed by those from Súchil, and the lighter-colored seeds from Canatlán and Nombre de Dios, may limit their health benefits in comparison to more pigmented alternatives. According to the literature, the seeds with the highest pigmentation, in this case those from Nuevo Ideal and El Mezquital, presented the highest levels and the one with the lowest phenolic content was the seed from Nombre de Dios, the lightest-colored seed included in this study.

Variation in phenolic composition and antioxidant activities between common bean cultivars and their processed products has also been widely studied, for example, Akon *et al.*, 2011; Suárez *et al.*, 2015; Aquino *et al.*, 2016. The phenolic profile can vary not just between cultivated varieties, but also between wild species, which can manifest similarities in composition. However, differences could occur due to factors like pigmentation (color) and their environmental adaptation, which influences their biochemical pathways. For instance, colored bean varieties often have higher levels of specific phenolic compounds compared to lighter colored ones due to the presence of additional pigments like anthocyanins. (Kleintop *et al.*, 2016; Murube *et al.*, 2021; Campa *et al.*, 2023). The significant differences among varieties highlight the importance of cultivar selection in breeding programs aimed at enhancing the nutritional quality of common beans. (Assefa *et al.*, 2019).

3.2 Phenolic compounds in leaves

Total Phenolic content

Regarding the content of phenolic compounds in leaves, significant variations were found (Table 3). The locality of Canatlán found higher TPC (828.98 mg GAE / 100 g DW), and in the locality of Nombre de Dios the lowest content was found (145.27 mg GAE / 100 g DW).

Flavonoid contents

The highest concentration in flavonoids was found in leaves population from El Mezquital (212.68 mg QE / 100 g DW) and the leaves populations of Nombre de Dios (48.45 mg QE / 100 g DW) and Súcil (49.57 mg EC / 100 g DW) were the ones that showed the lowest concentration. Some environmental factors such as ultraviolet radiation, low temperatures, droughts, water stress, among others, have been shown to induce the accumulation of anthocyanins in plants (Harlen *et al.*, 2018; Maleki *et al.*, 2019).

Total condensed tannins

The concentration of tannins in the leaves of the wild common bean evaluated showed values in a range of 5.20 mg EC / 100g DW to 10.91 mg ECE /100 g DW. The locality of Canatlán was the one with the highest concentration of condensed tannins (10.911 mg ECE / 100 g DW) and the town of Nuevo Ideal with the lowest amount (5.20 mg ECE / 100 g DW).

Anthocyanins

The concentration of anthocyanins in the leaves of the wild common bean evaluated showed values in a range of 3.89 mg C3OG / 100 g DE to 11.54 mg C3OG / 100 g DE. The locality of Nuevo Ideal along with that of Súcil presented higher levels than the rest of the analyzed leaves (11.54 and 10.09 mg C3OG / 100 g DE) respectively, the lowest value was found in the locality Nombre de Dios 3.89 mg C3OG / 100 g DE.

In this study the leaves were taken in the vegetative phase. At this stage, the leaves are usually more tender and softer. Young leaves, in particular, are rich in nutrients and bioactive compounds, such as phenolic compounds, which play important roles in defense against pests and diseases, as well as in the regulation of physiological processes. (Chávez & Sánchez 2017; Gaafar *et al.*, 2020; Šamec *et al.*, 2021). The leaves in which the greatest amount of phenolic compounds were obtained were those from Nuevo Ideal, El Mezquital and Canatlán and in which the least amount of these compounds was found is in the sample from Nombre de Dios, this coincides with what was found in the seeds analyzed in said study. The studies reported by Torche *et al.* (2018) have shown that young common bean leaves can be a valuable source of these compounds, which makes their study very significant in agrobiological and nutrition. The content of phenolic compounds in wild common bean leaves has

been little explored when compared to the studies that exist on the content of these same compounds in its seeds.

Table 3. Contents of total phenolics, flavonoids, condensed tannins, and anthocyanins of leaves of five wild forms of common bean (*Phaseolus vulgaris*) from Durango, Mexico.

Tabla 3. Contenido de fenoles totales, flavonoides, taninos condensados y antocianinas de hojas de cinco formas silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) de Durango, México.

Localities	Total phenolics ¹	Flavonoids ²	Condensed tannins ³	Anthocyanins ⁴
El Mezquital	550.08±18.18 ^a	212.68 ± 14.27 ^a	7.53 ± 0.34 ^b	7.02 ± 0.50 ^b
Súchil	276.85 ± 3.97 ^d	49.57 ± 3.49 ^d	5.51 ± 0.20 ^d	10.09 ± 1.76 ^a
Nombre de Dios	145.27 ± 13.78 ^e	48.45 ± 8.78 ^d	6.68 ± 0.15 ^c	3.89 ± 1.71 ^c
Canatlán	828.98 ± 22.52 ^a	94.17 ± 2.89 ^c	10.91 ± 0.14 ^a	5.76 ± 0.35 ^{bc}
Nuevo Ideal	398.45 ± 8.23 ^c	124.87 ± 3.06 ^b	5.20 ± 0.14 ^d	11.54 ± 2.32 ^a
Pr > F(Model)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.186
Significant	Yes	Yes	Yes	No

¹ Expressed in mg GAE / 100 g DW, ² In mg QE / 100 g DW, ³ In mg EC / 100 g DW, ⁴ In mg C3OG / 100 g DW. Different uppercase letters indicate significant differences between five populations ($p \leq 0.05$) (Fisher's test), media ± SD (n = 3), DE (Dry extract), DW (Dry weight).

3.3 PCA and cluster analysis

Principal component analysis (Fig. 2A) showed that principal component 1 (PC1) explained 95.58 % of the total variance. The first three components explain 99.99 %. The variable with the greatest contribution expressed by the PC1 was condensed tannins, with 95.58 %, PC2, flavonoids and total phenols, with 3.06 % of the variance, and the PC3 was anthocyanins with 1.55 %. The dendrogram of Fig. 2B indicates the grouping of the populations based on their similarity of contents of phenolic compounds, which revealed two groups, one for seeds and the other for leaves, within the group of leaves a greater similarity between the populations of Canatlán and Nuevo Ideal and within the group of seeds a greater similarity between the populations of Canatlán and El Mezquital and Nombre de Dios and Nuevo Ideal.

It has been reported that the pigments in seeds are attributed to phenolic compounds. A similar study conducted by Armendáriz, *et al.* (2019) informed a phenol concentration ranges from 19.75 mg to 221.48 mg gallic acid equivalents / g extract, in bean varieties grown with traditional methods in

Oaxaca, Mexico. However, the values obtained in our study range from 133.39 to 269.90 mg gallic acid equivalents/ g seed extracts.

The correlation between seed color and phenolic content may be crucial for understanding how these characteristics affect seed quality and potentially their survival and adaptation in different environmental conditions (Arteaga, 2021). Additionally, it is relevant to consider the role that these compounds may have not only in the physical properties of seeds and leaves but also in antioxidant properties and, therefore, in plant health (Colina, 2016; Bedoya & Maldonado, 2022; Sahu *et al.*, 2022).

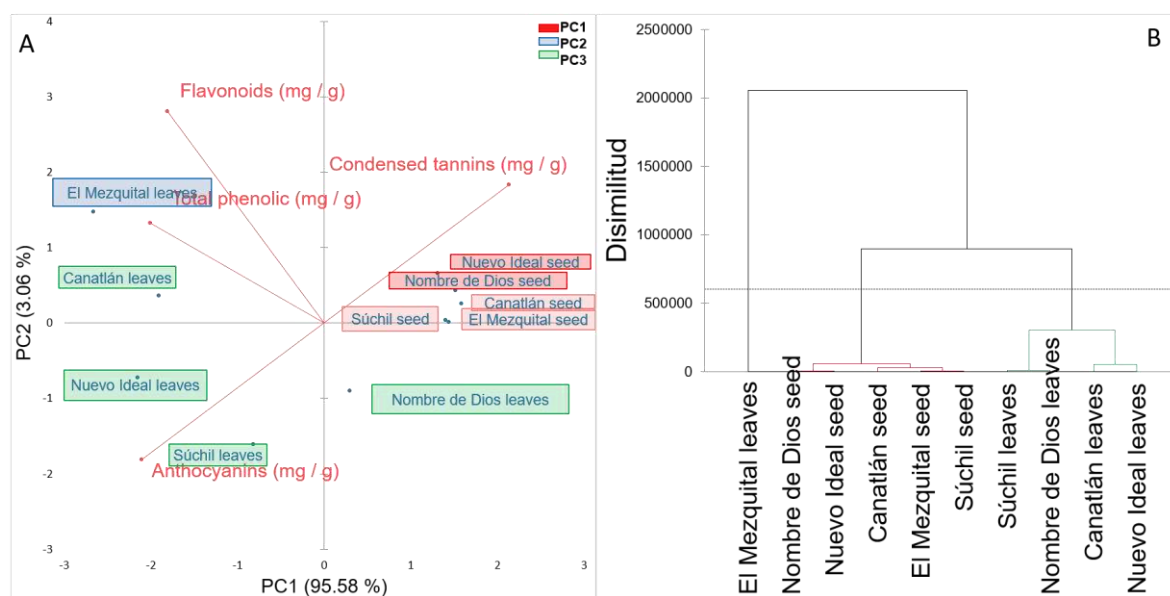


Figure 2. A) Results of a principal components analysis and B) dendrogram resulting from the comparison of the different phenolic contents of seeds and leaves of five wild populations of common bean (*Phaseolus vulgaris*) from Durango, Mexico.

Figura 2. A) Resultados del análisis de componentes principales y B) dendrograma resultante de la comparación de los diferentes contenidos fenólicos de semillas y hojas de cinco poblaciones silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) de Durango, México.

3.4 HPLC-DAD

The results of the HPLC-DAD analysis of the leaves and seeds of wild forms of common beans revealed this species is a rich source of phenolic compounds (Fig. 3). A total of 37 compounds were identified from wild common beans with this technique. Flavonols and phenolic acid were the major phenolic compounds in seeds (Table 4). The results are similar with those published by Reyes *et al.* (2014) and Capistrán *et al.* (2019), who also found 27 phenolics in the leaves of *P. vulgaris*, the major compounds were flavonols and phenolic acid.

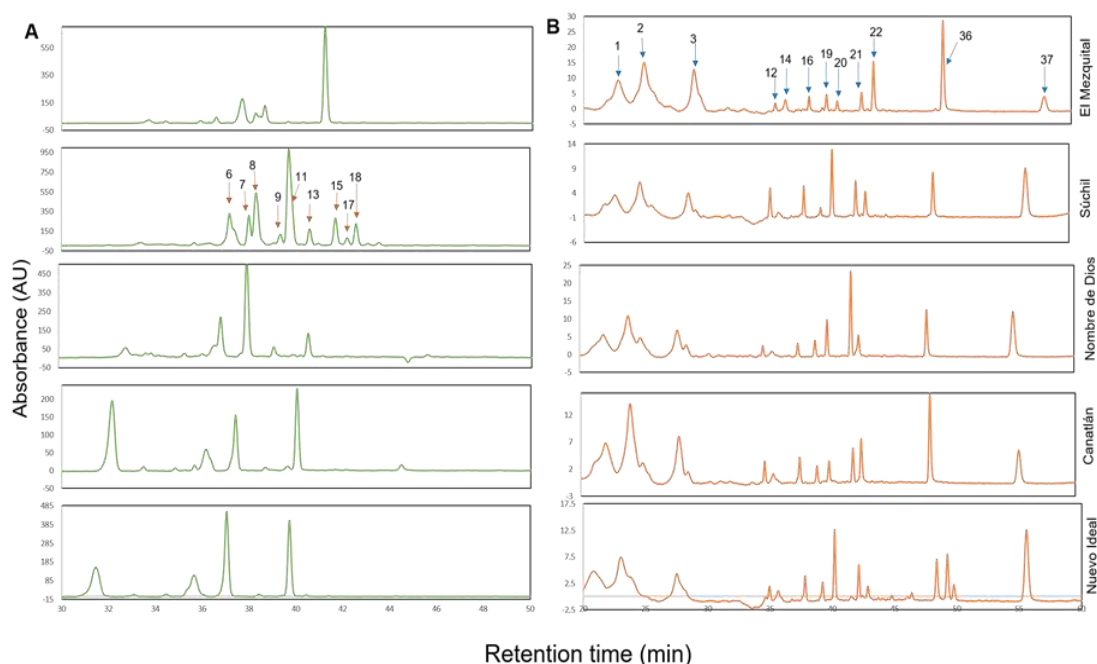


Figure 3. HPLC-DAD UV chromatograms of the leaves (A, registered at 265 nm) and seeds (B, registered at 340 nm) of wild forms of common bean from different regions of provenance of Durango, Mexico.

Figura 3. Cromatogramas UV HPLC-DAD de las hojas (A, registradas a 265 nm) y semillas (B, registradas a 340 nm) de formas silvestres de frijol común de diferentes regiones de procedencia de Durango, México.

The appearance of several absorption peaks, this fine structure reflects not only the different conformations such systems may assume, but also electronic transitions between the different vibrational energy levels possible for each electronic state. In the Table 4 are displayed the retention time and spectral data for each compound present in leaves and seeds. There are compounds that were observed both in leaves and seeds, but of the total of compounds eight of them were only found in seeds at the retention times of 36.6 min (Aromatic acid), 33.29 min (Flavonols), 35.15 min (Flavonols), 46.37 min (Dihydroflavonoids), 48.38 min (Flavonols), 49.35 min (Dihydroflavonoids), 55.36 min (Flavonols) and 57.35 min (Flavonols) and three were only found in leaves, at the retention times 34.58 min (Dihydroflavonols), 36.46 min (Flavonols) and 40.33 min (Flavonols). Chromatograms and UV spectra of some of the major compounds are shown in Fig. 4.

Table 4. Phenolic compounds found in leaves and seeds of wild forms of common bean from Durango, Mexico.
Tabla 4. Compuestos fenólicos encontrados en hojas y semillas de formas silvestres de frijol común de Durango, México.

Number of compound	Retention time (min)	$\lambda_{\max}$	Type of phenolic compound	Type of sample
1	21.663 $\pm$ 0.33	325	Aromatic acid	seeds
2	22.32 $\pm$ 0.00	240sh-296sh-325	Aromatic acid	seeds
3	22.82 $\pm$ 0.00	245sh-296sh-323	Aromatic acid	seeds
4	23.44 $\pm$ 0.39	239sh-296sh-323	Aromatic acid	seeds
5	24.54 $\pm$ 0.50	325	Aromatic acid	seeds
6	26.39 $\pm$ 0.43	274	Aromatic acid	Leaves and seeds
7	27.58 $\pm$ 0.33	293sh-308	Aromatic acid	Leaves and seeds
8	28.67 $\pm$ 0.33	293sh-308	Aromatic acid	Leaves and seeds
9	31.55 $\pm$ 0.33	289-324sh	Dihydroflavonoids	Leaves and seeds
10	31.60 $\pm$ 0.00	293sh-308	Aromatic acid	Seeds
11	32.48 $\pm$ 0.31	239sh-293sh-323	Aromatic acid	Leaves and seeds
12	33.29 $\pm$ 0.00	249-263sh-298sh-344	Flavonols	Seeds
13	33.45 $\pm$ 0.23	239sh-293sh-323	Aromatic acid	Leaves and seeds
14	34.58 $\pm$ 0.22	233sh-274-320sh	Dihydroflavonoids	Leaves
15	34.60 $\pm$ 0.00	288-334sh	Dihydroflavonoids	Leaves and seeds
16	35.14 $\pm$ 0.09	254-263sh-294sh-348	Flavonols	Seeds
17	35.69 $\pm$ 0.12	293sh-308	Aromatic acid	Leaves and seeds
18	36.4 $\pm$ 0.00	274-329	Flavones	Leaves and seeds
19	36.46 $\pm$ 0.18	251-266sh-346	Flavonols	Leaves
20	37.00 $\pm$ 0.00	254sh-268-290sh-350	Flavones	Leaves and seeds
21	37.52 $\pm$ 0.27	255-266sh-294sh-355	Flavonols	Leaves and seeds
22	38.42 $\pm$ 0.26	262-292sh-315sh-342	Flavonols	Leaves and seeds
23	38.60 $\pm$ 0.00	253-266sh-294sh-352	Flavonols	Leaves and seeds
24	39.30 $\pm$ 0.00	252-262sh-290sh-318sh-352	Flavonols	Leaves and seeds
25	39.50 $\pm$ 0.30	238sh-270-295sh-330	Flavonols	Leaves and seeds
26	40.10 $\pm$ 0.00	262-292sh-315sh-342	Flavonols	Leaves and seeds
27	40.33 $\pm$ 0.27	254-263sh-294sh-348	Flavonols	Leaves

28	41.70 ± 0.31	276	Aromatic acid	Leaves and seeds
29	41.80 ± 0.00	255-295sh-372	Flavonols	Leaves and seeds
30	42.21 ± 0.10	233sh-273-320sh	Aromatic acid	Leaves and seeds
31	42.70 ± 0.17	265-290sh-320sh-346	Flavonols	Leaves and seeds
32	43.62 ± 0.16	255-263sh-297sh-357	Flavonols	Leaves and seeds
33	46.37 ± 0.05	289-326sh	Dihydroflavonoids	Seeds
34	48.38 ± 0.25	240-292sh-330	Flavonols	Seeds
35	49.35 ± 0.12	289-326sh	Dihydroflavonoids	Seeds
36	55.36 ± 0.28	248-262sh-318sh-346	Flavonols	Seeds
37	57.35 ± 0.64	230sh-248-312sh327sh-360	Flavonols	Seeds

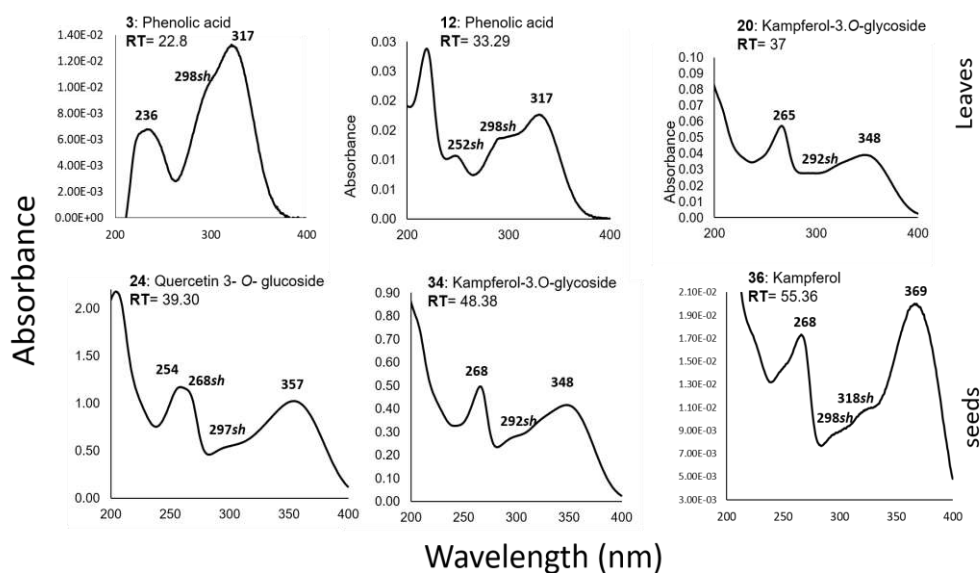


Figure 4. HPLC-DAD UV spectra (registered between 200 and 400 nm) of some phenolic compounds found in the methanol extract of leaves and seeds of wild forms of common bean from Durango, Mexico.

Figura 4. Espectros UV HPLC-DAD (registrados entre 200 y 400 nm) de algunos compuestos fenólicos encontrados en el extracto metanólico de hojas y semillas de formas silvestres de frijol común de Durango, México.

Phenolic compounds are an important group of secondary metabolites found in various plants, including the wild forms of common bean (*Phaseolus vulgaris*) (Espinoza *et al.*, 2016; Capistrán, 2019). In the methanolic extract of leaves and seeds of these varieties, several phenolic compounds are usually identified, which may include simple phenolics, flavonoids, tannins, and phenolic acids. This

study primarily found phenolic acids, known for their antioxidant properties (García-Díaz, 2016; Claros, 2021; Pérez *et al.*, 2020), and flavonols, such as quercetin and kaempferol, which have anti-inflammatory and antioxidant effects (Capistrán, 2019).

4. Conclusions

The results provide valuable insight into the variability in phytochemical content among different forms of wild beans, which could have significant implications for their use in breeding programs. The differences in anthocyanin, flavonoid, total phenolic, and tannin content between seeds and leaves suggest that each part of the plant may have different functions and benefits in terms of health and adaptation. The finding that the seeds from Nuevo Ideal exhibit the highest contents of total phenolic compounds (TPC), flavonoids (FC), condensed tannins (TCT), and anthocyanins (AC) is particularly relevant, as it indicates that this variety may have greater nutraceutical potential. On the other hand, the fact that Canatlán shows higher contents of TPC and TCT in the leaf tissue suggests that this population could be explored for phytochemical applications in health products or as antioxidant agents.

The variability in phenolic compound levels in populations growing at different altitudes also opens the door for future studies on how environmental conditions affect the biosynthesis of these metabolites. This could lead to a better understanding of plant adaptations to their environments and how the cultivation of wild beans can be optimized to maximize their phytochemical content. It would be interesting to consider the possibility of correlating this data with agroecological factors, such as water availability, sunlight, and soil nutrients, to have a more comprehensive overview. Additionally, investigating how these compounds affect resistance to pests and diseases could be key to ensuring the sustainability of wild bean populations in the future.

Acknowledgements

To CONAHCYT and the National Polytechnic Institute and for their support in carrying out this work.

Conflict of interest

This article was prepared for academic and scientific purposes only, noting that there is no conflict of interest in the publication of these results.

5. References

- Addinsoft, (2021). XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA. <https://www.xlstat.com>
- Akond, A. G. M., Khandaker, L., Berthold, J., Gates, L., Peters, K., Delong, H., & Hossain, K. (2011). Anthocyanin, total polyphenols and antioxidant activity of common bean. *American Journal of Food Technology*, 6: 385-394. <https://doi.org/10.3923/ajft.2011.385.394>

- Armendáriz-Fernández, K. V., Herrera-Hernández, I. M., Muñoz-Márquez, E., & Sánchez, E. (2019). Characterization of Bioactive Compounds, Mineral Content, and Antioxidant Activity in Bean Varieties Grown with Traditional Methods in Oaxaca, Mexico. *Antioxidants* 8(1): 26. <https://doi.org/10.3390/antiox8010026>
- Aquino-Bolaños, E. N., García-Díaz, Y. D., Chavez-Servia, J. L., Carrillo-Rodríguez, J. C., Vera-Guzmán, A. M. and Heredia-García, E. (2017). Anthocyanin, polyphenol, and flavonoid contents and antioxidant activity in Mexican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces. *Emirates Journal of Food & Agriculture* 28(8): 581-588. <https://ejfa.me/index.php/journal/article/view/1178>
- Arteaga-Castillo, S. M. (2021). Cultivos para el cambio climático: selección y caracterización de variedades de judía (*Phaseolus vulgaris* L.) y *Phaseolus lunatus* tolerantes a la sequía y salinidad (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/168450>
- Assefa, T., Assibi, M. A., Brown, A. V., Cannon, E. K., Rubyogo, J. C., Rao, I. M., & Cannon, S. B. (2019). A review of breeding objectives, genomic resources, and marker-assisted methods in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Molecular Breeding*, 39, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11032-018-0920-0>
- Bhuyan, D. J., & Basu, A. (2017). Phenolic compounds potential health benefits and toxicity. In *Utilisation of bioactive compounds from agricultural and food production waste* (pp. 27-59). CRC Press. <https://goo.su/CQkqX>
- Bedoya, R. A., & Maldonado, M. E. (2022). Características nutricionales y antioxidantes de la especie de frijol petaco (*Phaseolus coccineus*). *Revista chilena de nutrición*, 49(1): 34-42. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1388583>
- Bystricka, J., Musilova, J., Tomas, J., Vollmannova, A., Lachman, J., & Kavalcova, P. (2014). Changes of Polyphenolic Substances in the Anatomical Parts of Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.) during Its Growth Phases. *Foods* 3(4): 558-568. <https://doi.org/10.3390/foods3040558>
- Campa, A., Rodríguez-Madrera, R., Jurado, M., García-Fernández, C., Suárez-Valles, B., & Ferreira, J. J. (2023). Genome-wide association study for the extractable phenolic profile and coat color of common bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.). *BMC Plant Biology*, 23(1): 158. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04177-z>
- Carbas, B., Machado, N., Oppolzer, D., Ferreira, L., Queiroz, M., Brites, C., Rosa, E.A., & Barros, A. I. (2020). Nutrients, antinutrients, phenolic composition, and antioxidant activity of common bean cultivars and their potential for food applications. *Antioxidants*, 9(2): 186. <https://doi.org/10.3390/antiox9020186>
- Capistrán-Carabarin, A., Aquino-Bolaños, E. N., García-Díaz Y. D., Chávez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., & Carrillo-Rodríguez, J. C. (2019). Complementarity in Phenolic Compounds and the Antioxidant Activities of *Phaseolus coccineus* L. and *P. vulgaris* L. Landraces. *Foods* 8(8): 295. <https://doi.org/10.3390/foods8080295>
- Chávez-Mendoza, C., & Sánchez, E. (2017). Bioactive compounds from Mexican varieties of the common bean (*Phaseolus vulgaris*): Implications for health. *Molecules*, 22(8): 1360. <https://doi.org/10.3390/molecules22081360>
- Claros-Orsorio, P. D. P. (2021). Evaluación de la capacidad antioxidante total y contenido de polifenoles totales del *Phaseolus vulgaris* "Frijol". <http://hdl.handle.net/20.500.14067/5297>
- Colina-Ramos, A. C. (2016). Análisis fitoquímico, determinación cualitativa y cuantitativa de flavonoides y taninos, actividad antioxidante, antimicrobiana de las hojas de

- "Muehlenbeckia hastulata (JE Sm) IM Johnst" de la zona de Yuca (Cusco). [Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://goo.su/ed9KUg>
- da Graça, C. M., Markham, K. R. (2007). Structure information from HPLC and on-line measured absorption spectra: Flavones, Flavonols and Phenolic Acids. Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press. <http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0480-0>
- Del Valle, J. C., Buidé, M. L., Casimiro-Soriguer, I., Whittall, J. B., & Narbona, E. (2015). On flavonoid accumulation in different plant parts: variation patterns among individuals and populations in the shore campion (*Silene littorae*). *Front Plant Sci* 6: 939. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00939>
- Dzomba, P., Togarepi, E., & Mupa, M. (2013). Anthocyanin content and antioxidant activities of common bean species (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in Mashonaland Central, Zimbabwe. *African Journal of Agricultural Research*, 8(25): 3330-3333. <https://goo.su/1XaGg0C>
- Espinoza-García, N., Martínez-Martínez, R., Chávez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., Carrillo-Rodríguez, J. C., Heredia-García, E., & Velasco-Velasco, V. A. (2016). Contenido de minerales en semilla de poblaciones nativas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista fitotecnica mexicana*, 39(3): 215-223. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000300215&lng=es
- Falleh, H., Ksouri, R., Medini, F., Guyot, S., Abdelly, C., & Magné, C. (2011). Antioxidant activity and phenolic composition of the medicinal and edible halophyte *Mesembryanthemum edule* L. *Industrial Crops and Products* 34(1): 1066-1071. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.018>
- Gaafar, A. A., Ali, S. I., El-Shawadfy, M. A., Salama, Z. A., Şekara, A., Ulrichs, C., & Abdelhamid, M. T. (2020). Ascorbic acid induces the increase of secondary metabolites, antioxidant activity, growth, and productivity of the common bean under water stress conditions. *Plants*, 9(5), 627. <https://doi.org/10.3390/plants9050627>
- Ganesan, K., & Xu, B. (2017). Polyphenol-rich dry common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and their health benefits. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(11): 2331. <https://doi.org/10.3390/ijms18112331>
- García-Díaz, Y.D. (2016). Compuestos fenólicos y actividad antioxidante en testa y grano de 54 poblaciones nativas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) (Tesis Maestría en Ciencias Alimentarias, Universidad Veracruzana). <https://www.uv.mx/mca/files/2018/01/L.-N.-Yatzil-Denih-Garcia-Diaz.pdf>
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *CPFAC* 0(1): 1-13. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>
- Harlen, W. C., & Jati, I. R.A.P. (2018). Antioxidant activity of anthocyanins in common legume grains. In: Watson, R.R., Preedy, V.R., Zibadi, S. (Eds.) *Polyphenols: Mechanisms of action in human health and disease*. Academic Press. pp. 81-92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813006-3.00008-8>
- Heredia, R. L. (2017). Caracterización fisicoquímica y de compuestos bioactivos del frijol tepari (*Phaseolus acutifolius* gray) cultivado en Nuevo León, México. [Tesis de Maestría] Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/14362>
- Julkunen-Tiitto, R. (1985). Phenolic constituents in the leaves of northern willows: methods for the analysis of certain phenolics. *J. Agric. Food Chem.* 33(2): 213-217. <https://doi.org/10.1021/jf00062a013>
- Khang, D. T., Dung, T. N., Elzaawely, A. A., & Xuan, T. D. (2016). Phenolic profiles and antioxidant activity of germinated legumes. *Foods*, 5(2): 27. <https://doi.org/10.3390/foods5020027>
- Kleintop, A. E., Myers, J. R., Echeverria, D., Thompson, H. J., & Brick, M. A. (2016). Total phenolic content and associated phenotypic traits in a diverse collection of snap bean cultivars. *Journal*

- of the American Society for Horticultural Science, 141(1): 3-11. <https://doi.org/10.21273/JASHS.141.1.3>
- Kim, D. O., & Lee, C. Y. (2002). Extraction and isolation of polyphenolics. In: Wrolstad, R.E. (Ed.) *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons: New York. <https://doi.org/10.1002/0471142913.fai0102s06>
- Lauranson-Broyer, J., & Lebreton, P. (1993). Flavonoids and morphological traits of needles, as markers of natural hybridization between *Pinus uncinata* Ram and *Pinus sylvestris* L. *Biochem. Syst. Ecol.* 21(2): 241-247. [https://doi.org/10.1016/0305-1978\(93\)90041-O](https://doi.org/10.1016/0305-1978(93)90041-O)
- Maleki, S. J., Crespo, J. F., & Cabanillas, B. (2019). Anti-inflammatory effects of flavonoids. *Food chemistry*, 299: 125124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125124>
- McClean, P. E., Bett, K. E., Stonehouse, R., Lee, R., Pflieger, S., Moghaddam, S. M., Geffroy, V., Miklas, P., & Mamidi, S. (2018). White seed color in common bean (*Phaseolus vulgaris*) results from convergent evolution in the P (pigment) gene. *New Phytologist*, 219(3): 1112-1123. <https://doi.org/10.1111/nph.15259>
- Mojica, L., Berhow, M., & González de Mejia, E. (2017). Black bean anthocyanin-rich extracts as food colorants: Physicochemical stability and antidiabetes potential. *Food chemistry*, 229: 628-639. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.124>
- Mueller-Harvey, I., Bee, G., Dohme-Meier, F., Hoste, H., Karonen, M., Kölliker, R., Waghorn, G. C.... et.al. (2019). Benefits of condensed tannins in forage legumes fed to ruminants: Importance of structure, concentration, and diet composition. *Crop Science*, 59(3): 861-885. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0369>
- Murube, E., Beleggia, R., Pacetti, D., Nartea, A., Frascarelli, G., Lanzavecchia, G., Bellucci, E., Nanni, L., Gioia, T., Marciello, U., Esposito, S., Foresi, G., Logozzo, G., Frega, G. N., Bitocchi, E., & Papa, R. (2021). Characterization of nutritional quality traits of a common bean germplasm collection. *Foods*, 10(7): 1572. <https://doi.org/10.3390/foods10071572>
- Pérez-Perez, L.M., Del Toro Sánchez, C. L., Sánchez Chavez, E., González Vega, R. I., Reyes Díaz, A., Borboa Flores, J., ... Flores-Cordova, M.A. (2019). Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México, mediante un sistema gastrointestinal in vitro. *Biotechnia* 22(1): 117-125. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i1.1159>
- Reyes-Martínez, A., Almaraz-Abarca, N., Gallardo-Velazquez, T., González-Elizondo, M.S., Herrera-Arrieta, Y., Pajarito-Ravelo, A., Alanís-Bañuelos, R. E., & Torres-Morán, M. I. (2014). Evaluation of foliar phenols of 25 Mexican varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as antioxidants and varietal markers. *Natural Product Research* 28(23): 2158-2162. <https://doi.org/10.1080/14786419.2014.930855>
- Rodríguez-Madrera, R., Campa-Negrillo, A., Suárez-Valles, B., & Ferreira-Fernández, J.J. (2021). Phenolic content and antioxidant activity in seeds of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Foods*. 2021 Apr 15;10(4):864. <https://doi.org/10.3390/foods10040864>
- Sahu, P. K., Cervera-Mata, A., Chakradhari, S., Singh Patel, K., Towett, E. K., Quesada-Granados, J. J., Martín-Ramos, P., & Rufián-Henares, J. A. (2022). Seeds as potential sources of phenolic compounds and minerals for the Indian population. *Molecules*, 27(10): 3184. <https://doi.org/10.3390/molecules27103184>
- Šamec, D., Karalija, E., Šola, I., Vujčić Bok, V., & Salopek-Sondi, B. (2021). The Role of Polyphenols in Abiotic Stress Response: The Influence of Molecular Structure. *Plants*, 10(1): 118. <https://doi.org/10.3390/plants10010118>

- Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2017). Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: A review. *Food research international*, 101: 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.026>
- Suárez-Martínez, S.E., Ferriz-Martínez, R. A., Campos-Vega, R., Elton-Puente, J.E., de la Torre-Carbot, K., & García-Gasca, T. (2016). Bean seeds: leading nutraceutical source for human health. *CyTA-Journal of Food* 14(1): 131-137. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1063548>
- Torche, Y., Blair, M., Saida, C. (2018). Biochemical, physiological and phenological genetic analysis in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under salt stress. *Ann Agric Sci* 63(2): 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.10.002>
- Yang, Q. Q., Gan, R. Y., Ge, Y. Y., Zhang, D., & Corke, H. (2018). Polyphenols in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Chemistry, analysis, and factors affecting composition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(6): 1518-1539. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12391>
- Yusnawan, E., Nugrahaeni, N., Utomo, J.S. (2018). Changes of Phenolic Contents and Antioxidant Activity in Soybean Seeds Harvested from Phakopsora pachyrhizi Infected Crops. *J. Biol. Edu.* 10(2): 369-378. <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v10i2.14481>
- Zhang, H., Yu, D., Sun, J., Liu, X., Jiang, L., Guo, H., & Ren, F. (2014). Interaction of plant phenols with food macronutrients: characterisation and nutritional-physiological consequences. *Nutrition research reviews*, 27(1): 1-15. <https://doi.org/10.1017/S095442241300019X>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Efecto antifúngico de compuestos fenólicos del grano de maíz sobre el desarrollo *in vitro* de *Fusarium verticillioides*

Antifungal effect of phenolic compounds from maize grain on the *in vitro* development of *Fusarium verticillioides*

Norma Yadira Zacamo-Velázquez^{1*}, Javier Ireta-Moreno², Yolanda Salinas-Moreno², Ricardo Zacamo-Velázquez³

¹ Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez campus Zapotlanejo. Av. Tecnológico No. 300 Predio Huejotitlán. Zapotlanejo, Jalisco, México.

² INIFAP Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Av. Biodiversidad No. 2470. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

³ Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de los Altos. Carretera a Yahualica, Km. 7.5 Tepatitlán de Morelos, Jalisco. México

*Correspondencia: norma.zacamo@zapotlanejo.tecmm.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1754>

Recibido: 02 de enero de 2025; Aceptado: 31 de marzo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Guillermo Fuentes-Dávila

Resumen

La coloración del grano de maíz se debe a la presencia de diversos compuestos fenólicos (CF), los cuales contribuyen a la tolerancia de las infecciones por hongos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad antifúngica *in vitro* de extractos de maíz de líneas segregantes de color, de la cruz B49xPeruano(N), sobre el desarrollo de *Fusarium verticillioides*. Las mazorcas se clasificaron por color de grano utilizando un colorímetro. De los granos clasificados se obtuvo el espesor del pericarpio y los extractos fenólicos de cada línea. El ensayo de inhibición se hizo por la técnica de dilución en placa y de cada extracto se cuantificó la concentración de fenoles solubles totales (FST), flavonoides (Flav), y proantocianidinas (PAs). Se obtuvieron siete segregantes de color, de los cuales los extractos de los segregantes C2 y C3 presentaron un efecto fungistático significativamente mayor que el resto. El grano C1 presentó un mayor espesor de pericarpio, y su extracto tuvo una mayor concentración de FST, FLAV y PAs. Se encontró una correlación significativa entre las variables de concentración de CF y la inhibición de *F. verticillioides*. Una mayor concentración de compuestos fenólicos y una mayor inhibición del crecimiento del hongo se observó con maíces rojos en

comparación con maíces blancos y amarillos. Estos resultados comprueban el efecto fungistático de los compuestos fenólicos del maíz sobre este fitopatógeno.

Palabras clave: *Zea mays*, *Fusarium*, Compuestos fenólicos.

Abstract

The color of corn kernels is due to the presence of various phenolic compounds (PC), which contribute to the tolerance of fungal infections. The objective of this work was to evaluate the *in vitro* antifungal capacity of maize extracts from color segregant lines of the B49xPeruvian(N) cross, on the development of *Fusarium verticillioides*. Cobs were sorted by kernel color with a colorimeter. From the sorted kernels, pericarp thickness and phenolic extracts were obtained for each line. The inhibition assay was done by the plate dilution technique, and from each extract, the concentration of total soluble phenols (TSP), flavonoids (Flav), and proanthocyanidins (PAs) was quantified. Seven color segregants were obtained, from which the extracts of segregants C2 and C3 presented a significantly greater fungistatic effect than the rest. The C1 grain presented a higher pericarp thickness and its extract had a higher concentration of FST, FLAV and PAs. A significant correlation was found between the variables of CF concentration and inhibition of *F. verticillioides*. A higher concentration of phenolic compounds and a higher growth inhibition of the fungus were found with red corn compared to white and yellow corn. These results prove the fungistatic effect of corn phenolic compounds on this phytopathogen.

Keywords: *Zea mays* L, *Fusarium*, Phenolic compounds.

1. Introducción

La producción de maíz (*Zea mays* L.) se enfrenta a grandes desafíos, refiriendo de manera particular a las plagas y enfermedades. A nivel mundial se reportan pérdidas en rendimiento de hasta el 30 % (Porras, 2024) y baja calidad de grano a causa de las infecciones por hongos (Flores, 2024). Dentro de los patógenos más importantes se citan las especies del género *Fusarium* principalmente la especie *verticillioides* (*F. verticillioides* (Sacc.) Nirenberg), que es un patógeno del maíz y de otros cultivos alimentarios. Este hongo cosmopolita afecta a la planta durante todo su ciclo de cultivo, desde la etapa de germinación hasta la cosecha (Alberts *et al.*, 2016). El patógeno se desarrolla en la planta y se manifiesta finalmente en la mazorca como pudrición de grano.

Durante su crecimiento y desarrollo, *F. verticillioides* produce toxinas denominadas fumonisinas (Yu *et al.*, 2022), que están relacionadas con enfermedades en porcinos y equinos. En el ser humano, su ingesta se asocia con la deficiencia del desarrollo del tubo neural y cánceres de esófago e hígado (Marrez y Ayeshe, 2022). Las fumonisinas producidas por *F. verticillioides* son del tipo B, que se consideran las más tóxicas por su carácter cancerígeno (Zheng *et al.*, 2020).

Los compuestos fenólicos (CF) son producidos por las plantas como parte de sus mecanismos de defensa y han sido estudiados por sus propiedades antioxidantes (Ramírez *et al.*, 2022) antimicrobianas (Aourach *et al.*, 2021) y antifúngicas en los cultivos para alimentación humana y animal (Bernardi *et al.*, 2018). El grano de maíz acumula cantidades elevadas de CF, con niveles superiores a los observados en otros granos como trigo (*Triticum aestivum* L. y *Triticum durum* Desf.)

y arroz (*Oryza sativa* L.) (Adom y Liu, 2002). Los CF más abundantes en el grano de maíz son los ácidos fenólicos, que se encuentran predominantemente en forma ligada, esterificados a componentes de pared celular y concentrados en el pericarpio (Salinas *et al.*, 2017a); otros CF son los flavonoides, que predominan en forma soluble o extractable, y pueden ser incoloros como algunos flavonoles y flavanoles, o bien coloridos como las antocianinas y los flobafenos (Salinas *et al.*, 2017b).

Entre los flavonoides del grano de maíz destacan las proantocianidinas, que son monómeros, oligómeros y polímeros de flavan-3-ol. Las proantocianidinas (PAs) monoméricas carecen de color (catequina, epicatequina, epigallocatequina, entre otras), pero al polimerizarse adquieren un tono rojo ladrillo y se denominan taninos condensables (Schofield *et al.*, 2001). La oxidación de las PAs da lugar a los flobafenos (FBF) que son oligómeros o polímeros de los flavan 4-ols. Comúnmente se cuantifican de manera conjunta con las PAs, dadas sus similitudes estructurales y de polaridad. El contenido de PAs es mayor en el grano de maíz rojo ladrillo en relación al maíz azul morado (Luna, 2011).

Las actividades biológicas asociadas a PAs y FBF de maíz son similares a las que se adjudican a los flavonoides. Sin embargo, diversos estudios relacionan la acumulación de FBF en el grano de maíz con tolerancia a la infestación por *Fusarium*. Un estudio con variedades de maíz de diferentes colores de grano mostró que los granos rojo ladrillo, con mayor acumulación de FBF (polímeros de flavan 4-ols) fueron menos proclives a la producción de fumonisina B (Pilu *et al.*, 2011). Venturini *et al.* (2016) señalan una posible relación entre el nivel de flavonoides en el pericarpio del grano de maíz con diferentes pigmentaciones, con la tolerancia a producción de fumonisinas por *F. verticillioides*.

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad antifúngica *in vitro* de extractos de maíz de líneas segregantes de color, de la cruce B49xPeruano(N), sobre el desarrollo de *Fusarium verticillioides*.

2. Materiales y métodos

2.1 Material vegetal

Se utilizaron siete líneas de maíz segregantes de color, de la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990#, obtenida de la cruce B49 X Peruano(N) = B49 N. Esta cruce se realizó en el Campo experimental Centro Altos de Jalisco en Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicado en las coordenadas 20°49'01"N 102°43'59"O y a una altitud de 1806 msnm. Se cosecharon alrededor de 300 mazorcas, que se separaron por color. Las mazorcas de cada color se desgranaron manualmente y el grano de cada color (1-2 kg) se guardó en bolsas de papel y se mantuvo en refrigeración hasta su análisis. Las variantes de color analizadas se muestran en la Fig. 1.



Figura 1. Variabilidad en el color del grano observado en la población B49N RC1 CO TL 2016 990#.

Figure 1. Variability in grain color of the corn population B49N RC1 CO TL 2016 990#.

2.2 Características físicas del grano

Color. Se determinó el color del grano con el colorímetro Hunter Lab mini scan (EZ Plus modelo 450/0-L) en la escala CIE $L^*a^*b^*$. El grano se colocó sobre una base de plastilina, de acuerdo con lo descrito por Salinas-Moreno *et al.* (2021). Se obtuvieron los valores L^* , a^* , y b^* , con estas dos últimas variables se calculó el ángulo de tono Hue mediante la fórmula: $\text{Hue} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$. El índice de saturación de color se obtuvo de la expresión: $\text{Croma} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$ (McGuire, 1992).

Espesor de pericarpio (EP). Se realizó en diez granos, a los que se les removió con un bisturí el pericarpio. Se tomó el espesor en mm de cinco capas de pericarpio de la cara contraria al germen, con un micrómetro digital (digimatic Mitutoyo 293). El resultado se dividió entre cinco para obtener el dato de una capa de pericarpio. La medición de EP se realizó por duplicado y los resultados se expresaron en micras.

2.3 Extracción de compuestos fenólicos (CF) del grano

Cada muestra de grano separada por color se sometió a un desengrasado previo a su molienda para obtener los extractos de CF. El grano se fracturó con ayuda de un martillo y el germen se cortó en pedacitos, la muestra completa se colocó en un cartucho de papel filtro Whatman N° 1 y se sometió a extracción en equipo Soxhlet por 8 h a 40 °C, con éter de petróleo como solvente (Merck, Toluca, MX). Posteriormente, las muestras se mantuvieron en estufa a 60 °C por 24 h para eliminar restos de solvente, y se molieron en un molino ciclónico (UDY Corp.) provisto de una malla 0.05 mm. Las harinas obtenidas se colocaron en frascos ámbar que se cerraron herméticamente y se colocaron en refrigeración. La extracción de CF se realizó al día siguiente, ya que, una vez molida la muestra, los CF se degradan con facilidad.

La extracción se realizó a partir de 1 g de harina que se mezcló con 20 mL de una mezcla de acetona: agua: ácido acético en proporciones 90:9.5:0.5, que es el solvente adecuado para extraer PAs y FBF. La muestra se sonicó por 15 min en un baño sonicador (Branson modelo 2510R-MT, EUA), y después se colocó por 1 h en un agitador horizontal (Gyrotory shaker modelo G10, US). La muestra se centrifugó (Hettich modelo D-78532, Alemania) por 15 min a 4000 rpm. El sobrenadante se filtró con papel Whatman N° 4, se midió el volumen del sobrenadante el cual se colocó en tubos de vidrio que se sellaron con parafilm y protegidos de la luz con papel aluminio, se conservaron en congelación antes de su análisis (Salinas *et al.*, 2017b).

2.4 Cuantificación de CF en los extractos

Fenoles solubles totales (FST). Se utilizó el método de Folin-Ciocalteu (FC) (Singleton y Rossi, 1965), donde 100 μL del extracto, se mezclaron con 125 μL del reactivo FC y se dejó reaccionar por 6 min; posteriormente se agregaron 1250 μL de Na_2CO_3 y 1525 μL de agua destilada. La muestra se agitó en Vortex y se dejó en reposo por 90 min a temperatura ambiente y en oscuridad. Luego se centrifugó y se midió su absorbancia en un espectrofotómetro (Perkin-Elmer Lambda 25 UV/Vis) a 760 nm. El contenido de FST se calculó con base a una curva patrón de ácido ferúlico. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido ferúlico (EAF) por 100 g de muestra seca. Los análisis se realizaron por duplicado.

Proantocianidinas (PAs). Se cuantificaron por el método 4-dimetilaminocinamaldehído (DMAC) descrito por Wallace y Giusti, (2010). A 200 μ L del extracto colocados en un tubo de ensayo se le añadieron 1000 μ L de reactivo DMAC (Sigma-Aldrich) al 2 % [previamente preparado con metanol grado HPLC (Sigma-Aldrich) acidificado con ácido sulfúrico 2N]; inmediatamente se agregaron 1800 μ L de metanol grado HPLC para completar 3 mL. La muestra se agitó en vortex y se dejó reaccionar en oscuridad por 30 min. Se midió la absorbancia en un espectrofotómetro a 640 nm. Se preparó una curva estándar de catequina (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EUA). Los resultados se reportaron como mg de catequina equivalentes por kg de muestra seca (mg EC/kg MS). Los análisis se realizaron por duplicado.

Flavonoides (FLAV). Se utilizó la técnica del cloruro de aluminio descrita por Sumczynski *et al.* (2017). Se mezclaron 8.5 mL de metanol al 20 % (metanol/agua) con 850 μ L del extracto y 375 μ L NaNO₂ 0.5 M en un tubo de ensayo. Se agitó vigorosamente en vortex y se dejó reaccionar en oscuridad por 5 min, transcurrido este tiempo se adicionaron 375 μ L de cloruro de aluminio, se agitó nuevamente en vortex y se mantuvo en oscuridad por 5 min. Posteriormente se agregaron 2.5 mL de NaOH 1M, se agitó nuevamente y se dejó reaccionar por 10 min. Finalmente, la muestra se centrifugó a 4000 rpm por 10 min y se determinó la absorbancia a 506 nm en el espectrofotómetro. Se elaboró una curva estándar de catequina y los resultados se expresaron en mg equivalentes de catequina por kg de muestra seca (mg EC/kg MS).

2.5 Preparación de inóculo fúngico

Para el inóculo fúngico se utilizó una cepa de *F. verticillioides* aislada de maíz. La cepa fue seleccionada de trabajos anteriores por su capacidad de infección según Zacamo *et al.* (2023). Para reactivar la cepa, se preparó medio de cultivo agar-papa-dextrosa (APD) (Bioxon). Se disolvieron 39 g de medio de cultivo deshidratado en 1 L de agua destilada, se colocó en un agitador magnético (Lab-tech) a 50 °C para obtener una solución homogénea. Ya disuelto, se esterilizó en autoclave (Yamato, SM200, Japón) a 121 °C por 20 min. El medio de cultivo estéril se vació en cajas Petri de 10 cm de diámetro y se dejó solidificar. Cuando el medio de cultivo solidificó, se obtuvo un explante de la cepa original con un sacabocados de 1,2 cm de diámetro, el explante se colocó al centro de cada una de cinco cajas Petri con medio de cultivo APD. Las cajas Petri se sellaron con parafilm y se mantuvieron en condiciones ambientales de temperatura entre 18 – 27 °C por 8 días.

2.6 Ensayo de inhibición por dilución en placa

Los extractos se concentraron en un rotavapor (Buchi R-215, Vacuum pump V-700, EUA) para eliminar el solvente, hasta llegar a un volumen de 1 mL. Previamente se preparó medio de cultivo APD de acuerdo al apartado anterior, el medio de cultivo se dividió en alícuotas de 10 mL, se pusieron en tubos de ensayo y se esterizaron en autoclave (Yamato, SM200, Japón) a 121 °C por 20 min. Los tubos con el medio de cultivo ya estéril se dejaron enfriar hasta una temperatura de 40 °C $\pm$ 5 °C, y se les agregó 0.5 mL del extracto concentrado, se agitaron vigorosamente en vortex y se vaciaron en placa de plástico de 5 cm de diámetro. Una vez que solidificó la mezcla de medio de cultivo con el extracto, las cajas se inocularon con un explante de la cepa de *F. verticillioides* de ocho días de crecimiento. El explante se obtuvo con un sacabocados circular de 1.2 cm de diámetro y se colocó al centro de cada caja Petri. Se agregó un testigo positivo con Itraconazol 0.5 mL (20 ppm)

(Senosiain) de acuerdo a los resultados de Salinas *et al.* (2023), y un testigo negativo, al cual se agregó 0.5 mL de agua estéril en lugar de extracto (Ochoa *et al.*, 2012). La evaluación se hizo con dos repeticiones por cada tratamiento. El procedimiento de este apartado se llevó a cabo dentro de la campana de flujo laminar.

El diámetro de crecimiento *F. verticillioides* se midió cada 48 h. El porcentaje de inhibición se calculó de acuerdo a Moreno *et al.* (2011), con la ecuación 1:

$$\text{Ec. 1} \quad \text{Porcentaje de inhibición} = \frac{(\text{Área del testigo} - \text{Área del tratamiento})}{(\text{Área del Testigo})} \times 100$$

2.7 Diseño experimental y análisis de datos

Con los datos se realizó análisis de varianza con un diseño completamente al azar, ajustado al modelo $Y_{ij} = \mu_0 + T_i + E_{ij}$, en donde los tratamientos fueron los diferentes granos de maíz de las muestras. Al obtener diferencias significativas se aplicó la prueba post hoc Tukey ($\alpha=0.05$). Posterior a esto, se realizó un análisis de correlación de Pearson y un análisis de regresión con las concentraciones de FST, FLAV, y PAs y la variable porcentaje de inhibición. Los datos se analizaron en el programa estadístico SAS versión 9.3.

3. Resultados y discusión

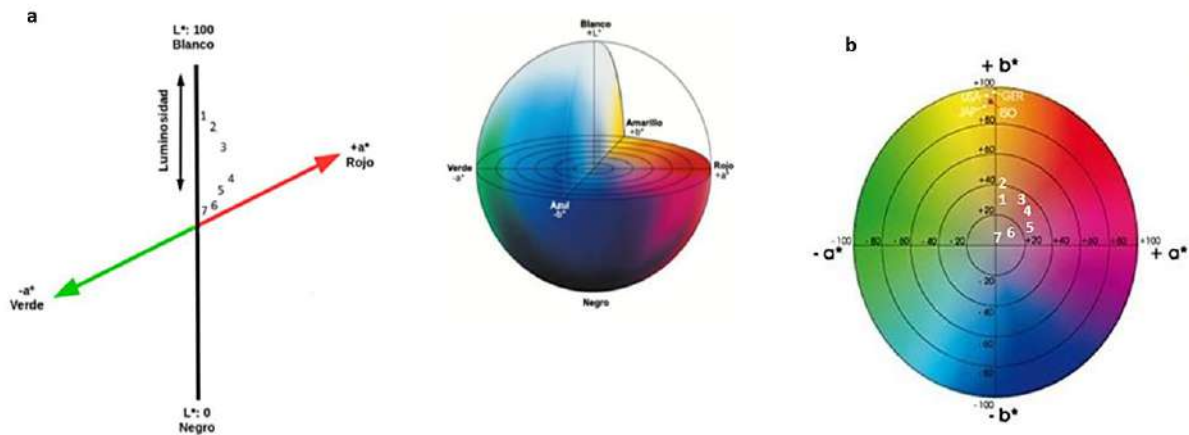
3.1 Color de grano

Cada una de las tonalidades fue clasificada por sus características de color (Tabla 1). Cada grupo de maíces se situó de acuerdo a su luminosidad en el plano que corresponde al valor de L^* y a^* (Fig 2a). Los siete grupos de maíces se situaron en el rango entre 18 y 73 %, del grupo C1 al C3 presenta una menor luminosidad por debajo los grupos C4 al C7 (Fig. 2a). En el plano a^*b^* se ubican los grupos de acuerdo a la pureza de color, los grupos de semillas C1 al C4 presentaron una mayor pureza de color que los grupos C5, C6 y C7.

Tabla 1. Variables de color de grano en las segregaciones observadas en la población de maíz B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.**Table 1.** Grain color variables in segregations in the corn population B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

Maíces	Variables de color de grano				
	L*(%)	a*	b*	Hue°	Croma
C1	18 ± 2	4 ± 1	2 ± 0.5	208 ± 3	5 ± 1
C2	20 ± 3	14 ± 1	7 ± 1	202 ± 2	16 ± 2
C3	31 ± 3	20 ± 2	17 ± 2	155 ± 3	26 ± 2
C4	31 ± 4	24 ± 4	20 ± 2	158 ± 4	31 ± 2
C5	40 ± 5	24 ± 3	31 ± 3	118 ± 3	39 ± 3
C6	54 ± 6	18 ± 2	33 ± 3	91 ± 4	38 ± 4
C7	73 ± 6	3 ± 1	29 ± 2	16 ± 2	29 ± 2

Medias de 20 mazorcas por tratamiento medidas con un colorímetro hunter mini scan EZ. L*=luminosidad a*=verde/rojo-morado. b*=amarillo/azul. Hue ángulo= 0° rojo-morado, 90° amarillo, 180° verde, 360° azul. Croma=grado de gris

**Figura 2.** Grupos de maíces situados por su valor de L* a* b* que caracterizan el color de grano. L*=luminosidad. a*= verde/rojo-morado. b*=amarillo/azul. Croma=grado de gris. Hue ángulo= 0° rojo-morado, 90° amarillo, 180° verde, 360° azul.**Figure 2.** Maize groups ranked by L* a* b* value characterizing kernel color. L*=luminosity. a*=green/red-purple. Chroma=degree of gray. b*=yellow/blue. Hue angle= 0° red-purple, 90° yellow, 180° green, 360° blue.

3.2 Espesor de pericarpio (EP)

El análisis de varianza del EP de los granos de maíz analizado mostró diferencias significativas. El EP tuvo una variación desde 83.9 hasta 147.4 μm . La comparación de medias mostró cuatro grupos siendo el maíz C1 el que presentó un mayor espesor (147.4 μm), seguido del C3 (123.7 μm), C5 (113.7 μm), C4 (111.7 μm), C2 (93.2 μm) y finalmente C6 y C7 (85 y 83.9 μm) (Fig 3).

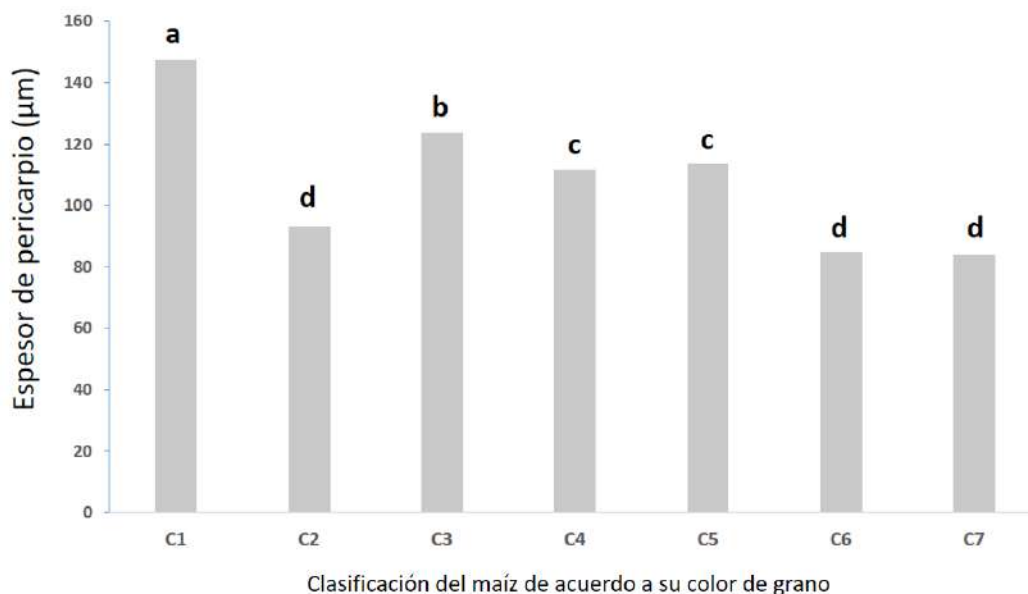


Figura 3. Espesor de pericarpio de los granos de maíz de la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990# clasificados de acuerdo a su color de grano. Barras con letra diferente indica grupos diferentes

Figure 3. Pericarp thickness of corn grains from population B49N-RC1-CO-TL-2016-990# classified according to grain color. Bars with different letters indicate different groups.

3.3 Análisis de compuestos fenólicos de granos de maíz

El análisis de varianza reveló diferencias estadísticas entre las muestras analizadas para las variables fenólicas consideradas (Tabla 2).

La presencia de los compuestos fenólicos (FST) fue diferente estadísticamente entre las muestras de maíz analizadas. Los valores más elevados se observaron en C1 y C2, que son las muestras de grano morado, en tanto que no existió diferencia entre las muestras C3 a C7. Las muestras C3 y C4 corresponden a grano color rojo ladrillo. Los valores de FST obtenidos se ubican por arriba del rango de 988.9 - 2257.6 μg , equivalentes de ácido gálico (EAG)/g de muestra seca reportado por Luna (2011), en cinco maíces de grano rojo ladrillo. Aunque el autor antes mencionado utilizó el mismo solvente de extracción que en el presente estudio, las diferencias se atribuyen a que los resultados se reportan en función del contenido de ácidos fenólicos diferentes. Según Ramírez *et al.* (2021), los FST

del grano de maíz reportados en función del ácido ferúlico son mayores que cuando se reportan en función del ácido gálico.

Tabla 2. Análisis de varianza de los compuestos fenólicos en las diferentes coloraciones del grano de maíz.

Table 2. Analysis of variance of the phenolic compounds in the different colorations of the corn grain

Variable	Cuadrados medios	Media (µg/g)	R ²	C.V.
Fenoles solubles totales (FST)	59.4 **	1908.2	0.96	7.41
Flavonoides (FLAV)	43.43**	596	0.95	13.49
Proantocianidinas (PAs)	43.92**	46.8	0.95	20.18

** Diferencias estadísticas significativas R² Coeficiente de determinación. C.V. Coeficiente de variación

**Significant statistical differences. R² Coefficient of determination. C.V. Coefficient of variation

Un patrón similar se observó para el contenido de PAs, en donde las muestras C1 y C2 fueron las de mayor concentración y estadísticamente diferentes al resto de las muestras C3-C7, con menores valores. La concentración de PAs representa del 1.3 al 3.5 % de los FST y del 20 al 45 % está representado por la concentración de flavonoides (Tabla 3).

Tabla 3. Contenido de compuestos fenólicos en extractos de grano de maíz con diferentes colores de la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

Table 3. Content of phenolic compounds in extracts of corn grain with different colors of the population B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

Extracto	FST µg/g eq AF/gMS	Flav µg/g eq AF/gMS	PAs µg/g eq CAT/gMS
C1	3203.1 ^a	1220.63 ^a	112.13 ^a
C2	2229.6 ^b	651.07 ^b	83.30 ^b
C3	1819.6 ^c	538.33 ^{bc}	38.600 ^c
C4	1575.7 ^c	664.47 ^b	28.53 ^c
C5	1543.40 ^c	399.90 ^c	23.33 ^c
C6	1472.1 ^c	347.07 ^c	22.16 ^c
C7	1533.3 ^c	336.47 ^c	21.100 ^c

Valor promedio de tres repeticiones. FST: Fenoles solubles totales Flav: Flavonoides PAs: Proantocianidinas AF: ácido ferúlico MS: Materia seca CAT: catequina. Letras diferentes indica grupos diferentes.

Average value of three repetitions. FST: Total soluble phenols Flav: Flavonoids PAs: Proanthocyanidins AF: ferulic acid MS: Dry matter CAT: catechin. Different letters indicate different groups.

3.4 Ensayo de inhibición *in vitro* de los extractos fenólicos sobre *F. verticillioides*

Se observaron diferencias altamente significativas entre los extractos de las 7 líneas de maíz segregantes de color y su efecto sobre el desarrollo vegetativo de *F. verticillioides*. La diferencia se mantuvo durante los 8 días de medición.

Los mayores porcentajes de inhibición se observaron en los extractos del uno al cinco, se observó una mayor inhibición a las 96 h; la inhibición disminuyó a las 144 y 192 h, lo cual se puede atribuir a la pérdida de estabilidad de los compuestos. De acuerdo con Flores *et al.* (2018), los extractos fenólicos pierden su estabilidad a temperatura ambiente (20-30 °C). Durante la experimentación, las cajas Petri se mantuvieron a temperatura ambiente para permitir el crecimiento natural del hongo en el medio de cultivo (Tabla 4, Fig. 4).

Tabla 4. Efecto inhibitorio de los extractos fenólicos sobre el crecimiento radial de *F. verticillioides* en medio de cultivo APD desde las 48 hasta las 192 h.

Table 4. Inhibitory effect of phenolic extracts on radial growth of *F. verticillioides* in APD culture medium from 48 to 192 h.

Extracto	Inhibición (%)			
	48 h	96 h	144 h	192 h
C1	51± 9.7 ^a	65 ± 3.9 ^a	54 ± 1.7 ^a	15 ± 3.9 ^a
C2	57 ± 8.6 ^a	67 ± 5.8 ^a	55 ± 7.0 ^a	18 ± 2.7 ^a
C3	57 ± 8.6 ^a	66 ± 2.3 ^a	54 ± 4.2 ^a	15 ± 3.8 ^{ab}
C4	42 ± 4.4 ^{ab}	56 ± 2.9 ^{ab}	43 ± 1.9 ^a	4 ± 1 ^{ab}
C5	42 ± 4.5 ^{ab}	52 ± 5.6 ^{ab}	18 ± 3.1 ^{bc}	0 ± 1 ^b
C6	36 ± 4.8 ^{ab}	30 ± 6.4 ^b	10 ± 2.7 ^c	0 ± 0.5 ^b
C7	46 ± 6.3 ^{ab}	45 ± 4.8 ^{ab}	24 ± 1.1 ^b	0 ± 1 ^b
Itraconazol	26 ± 2.63 ^b	28 ± 2.8 ^b	17 ± 2.3 ^c	0 ± 0.5 ^b

Valor promedio de dos repeticiones. Diferentes letras indican diferentes grupos estadísticos (Tukey, $\alpha=0.05$).

Average value of two repetitions. Different letters indicate different statistical groups (Tukey, $\alpha=0.05$).

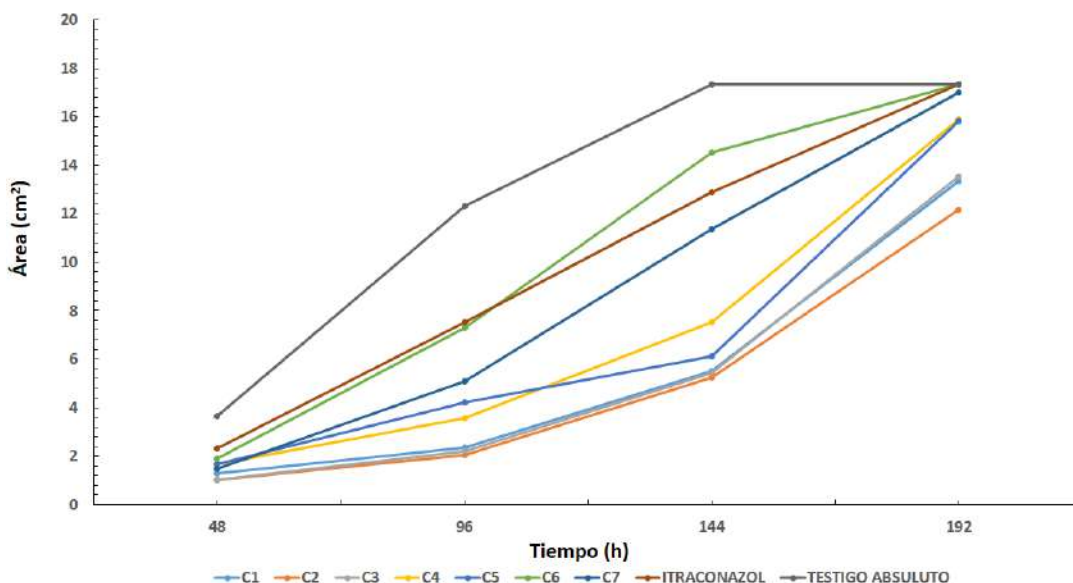


Figura 4. Crecimiento micelial de *F. verticillioides* en presencia de los extractos de compuestos fenólicos del grano de maíz de la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

Figure 4. Mycelial growth of *F. verticillioides* in the presence of extracts of phenolic compounds from corn grain of population B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

Los extractos de las semillas C6 y C7 mostraron una mayor inhibición a 48 h de incubación y disminuyó en las 72, 96 y 120 h del experimento. El testigo positivo debería inhibir aún más que los extractos fenólicos, sin embargo, se observó que la concentración de 20 ppm no fue suficiente para disminuir el crecimiento del hongo.

En general en el ensayo *in vitro* se observó que los extractos fenólicos de los maíces C2 y C3 retardan el crecimiento micelial de *F. verticillioides* en mayor porcentaje (57 %), es decir, tiene un efecto fungistático sobre *F. verticillioides*. Seguido de estos se encuentra el extracto del grano C1, que a pesar de tener una mayor concentración de fenólicos inhibió 6.0 % menos que los extractos del grano C2 y C3. El extracto C1 se obtuvo del color de grano azul-morado, este color es dado principalmente por la concentración de antocianinas, entre las que se encuentran cianidina-3- β -glucósido, pelargonidina-3- β -glucósido y peonidina-3- β -glucósido.

Rosas *et al.* (2021) reportaron que el extracto obtenido de *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton mostró una inhibición alta sobre especies de *Fusarium in vitro* (>80 %). Los autores indican que se requirió una CL_{50} menor, comparada con los extractos de *Sorghum bicolor* (L.) Moench. y *Moringa oleífera* Lam. El perfil polifenólico realizado por cromatografía líquida de alta resolución acoplada a la espectrometría de masas (HPLC-MS), mostró que una de las diferencias en el contenido de fenólicos fue la ausencia de antocianinas en el extracto que presentó una mayor efectividad.

La inhibición de *F. verticillioides* puede deberse a lo siguiente: Los compuestos fenólicos actúan sobre la membrana lipídica de *F. verticillioides*, al entrar en contacto con el hongo, modifican la permeabilidad de la membrana celular. Debido a esta modificación, se provoca la fuga de moléculas intracelulares (Gallegos *et al.*, 2022). Aourach *et al.* (2021) observaron malformaciones en el micelio

de *F. oxysporum* Schlecht. expuesto a compuestos fenólicos, así como la formación de septos irregulares en las hifas y conidios no germinados. Por otro lado, según Villa *et al.* (2015) *Fusarium* produce enzimas pectolíticas que se consideran las primeras enzimas producidas para penetrar la pared celular e infectar al huésped, y los flavonoides del tipo catequinas son los responsables de inactivar estas enzimas.

Las variables FST, Flav y PAs presentaron una correlación significativa ($p < 0.0015$) y fuerte (< 0.90), entre si, esto es de esperarse porque, en la mezcla de los FST se encuentran contenidas las PAs y Flav. Así mismo, FST, FLAV y PAs mostraron una correlación significativa y directamente proporcional a la inhibición del crecimiento vegetativo de *F. verticillioides* (0.71) (Fig. 5).

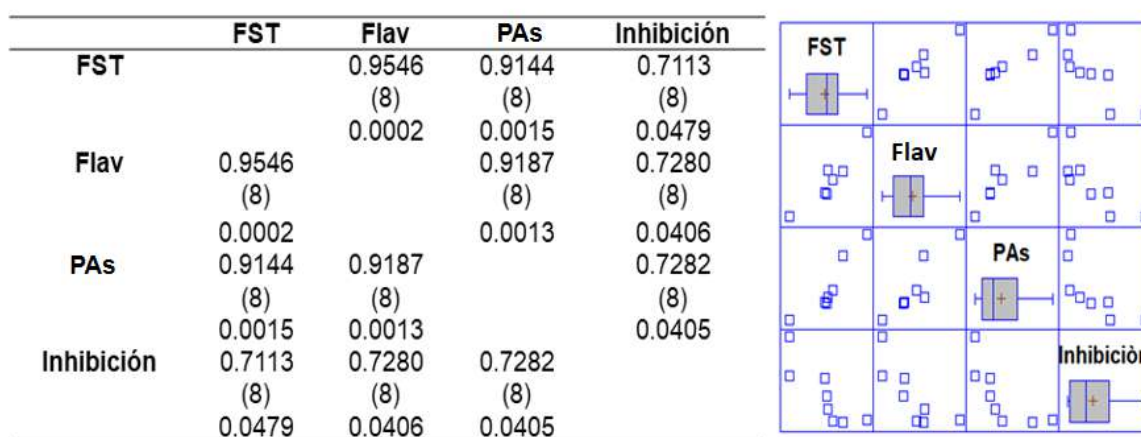


Figura 5. Análisis de correlación de las variables FST, Flav, y PAs de la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990# con la inhibición del crecimiento de *F. verticillioides*.

Figure 5. Correlation analysis of the variables FST, Flav, and PAs of the population B49N-RC1-CO-TL-2016-990# with growth inhibition of *F. verticillioides*.

También se observó una regresión positiva entre la concentración de FST, Pas, FLAV, y el porcentaje de inhibición, esto es, a mayor concentración de fenoles aumentó el porcentaje de inhibición.

Los fenoles solubles se encuentran en mayor concentración en el germen del maíz, seguido del pericarpio y finalmente en el endospermo (Cabrera *et al.*, 2009), en su totalidad explican el 57 % de la inhibición sobre *F. verticillioides*; estos fenoles se pueden dividir en fenoles libres, glicosilados y esterificados (Cabrera *et al.*, 2009).

Dentro de la fracción soluble de los fenoles esterificados, se pueden localizar trazas de ácidos fenólicos. Los fenoles ligados son el ácido ferúlico, ácido p-cumárico y ácido sinápico (Urías *et al.*, 2016). El ácido ferúlico puede disminuir la biomasa de *F. verticillioides* hasta un 27 % (Ferrigo *et al.*, 2021); se requiere una concentración de ácido ferúlico de 1,000,000 $\mu\text{g/kg}$ para alcanzar una inhibición del 64 % sobre *F. graminearum* Schwabe (Schöneberg *et al.*, 2018).

Dentro de los fenoles esterificados se encuentran los flavonoides, que son parte de los fenoles solubles totales, y estos en conjunto explican el 52 % de la inhibición obtenida. Dentro de los flavonoides se pueden encontrar los flavonoles, flavonas, antocianidinas y los flavanos (Martínez *et al.*, 2002). La inhibición del desarrollo vegetativo de *F. verticillioides* causado por la presencia de los compuestos fenólicos, depende de varios factores como la naturaleza de los compuestos, la concentración, además de que se reporta que dicha inhibición se logra porque los compuestos fenólicos actúan en sinergia (Aourach *et al.*, 2021) (Fig. 6).

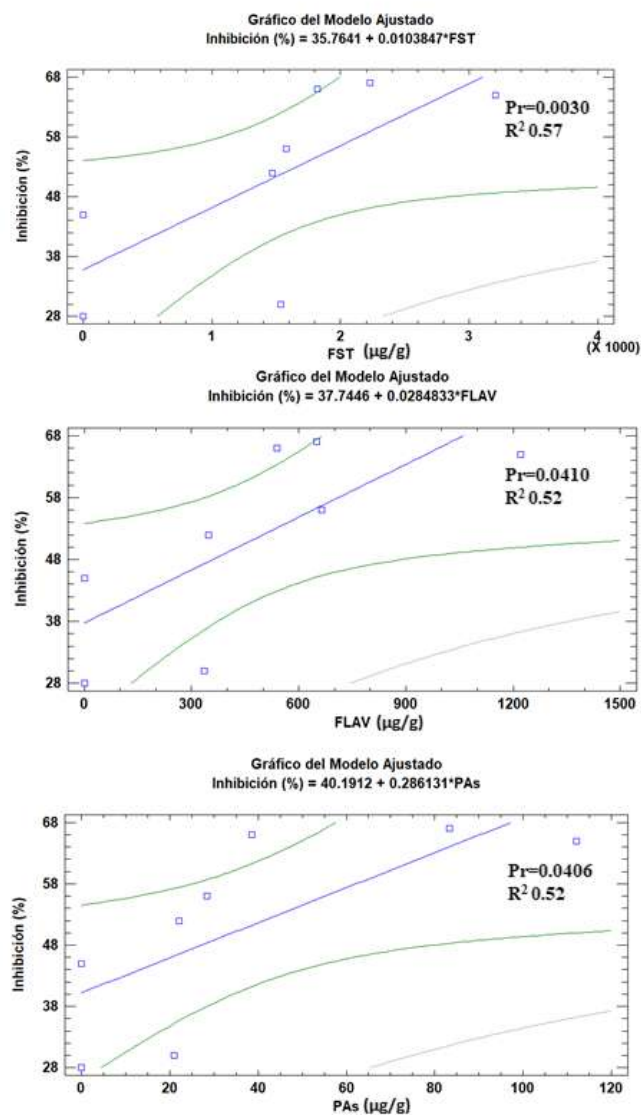


Figura 6. Análisis de regresión de las variables inhibición *in vitro* (%) y concentración de compuestos fenólicos de la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

Figure 6. Regression analysis of the variables *in vitro* inhibition (%) and concentration of phenolic compounds of the population B49N-RC1-CO-TL-2016-990#.

4. Conclusiones

Los resultados del ensayo *in vitro*, mostraron que los extractos fenólicos de los maíces de color rojo presentaron una mayor inhibición sobre el crecimiento radial de *Fusarium verticillioides*. Los extractos de los maíces de coloración blanca y amarilla presentaron una menor inhibición, al hacer la comparación con los extractos de maíces rojos. Esta capacidad se atribuye a la concentración de compuestos fenólicos, ya que la población B49N-RC1-CO-TL-2016-990#, aunque presenta diferente coloración de grano, los maíces son genéticamente muy parecidos.

Los extractos fenólicos son una alternativa para el control de *F. verticillioides*, sin embargo, es prioridad su caracterización como responsables de brindar esta tolerancia. Por otro lado, el uso de extractos vegetales es una alternativa para el control de hongos en los productos agrícolas. En este trabajo se observó que algunos extractos mostraron un control sobre el crecimiento del hongo durante los 8 días evaluados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, por el apoyo para la realización de este estudio.

Conflicto de interés

Los autores reportan no tener conflicto de intereses para la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Adom, K.K., & Liu, R.H. (2002). Antioxidant Activity of Grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (21): 6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
- Alberts, J. F., Van Zyl, W. H., & Gelderblom, W. C. (2016). Biologically Based Methods for Control of Fumonisin-Producing *Fusarium* Species and Reduction of the Fumonisin. *Frontiers in Microbiology*, 7: 548. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00548>
- Aourach, M., Barbero, G. F., González de Peredo, A. V., Diakite, A., El Boukari, M., & Essalmani, H. (2021). Composition and antifungal effects of aqueous extracts of *Cymbopogon citratus*, *Laurus nobilis* and *Santolina chamaecyparissus* on the growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lentis*, *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 54(19-20): 2141-2159. <https://doi.org/10.1080/03235408.2021.1922169>
- Bernardi, J., Stagnati, L., Lucini, L., Rocchetti, G., Lanubile, A., Cortellini, C., De Poli, G, Busconi, M., & Marocco, A. (2018). Phenolic Profile and Susceptibility to *Fusarium* Infection of Pigmented Maize Cultivars. *Frontiers in Plant Science* 9:1189. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01189>
- Cabrera-Soto, M. L., Salinas-Moreno, Y., Velázquez-Cardelas, G. A., & Espinosa-Trujillo, E. (2009). Contenido de fenoles solubles e insolubles en las estructuras del grano de maíz y su relación con

- propiedades físicas. *Agrociencia*, 43(8): 827-839. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30215547005>
- Ferrigo, D., Bharti, S., Mondin, M., & Raiola, A. (2021). Effect of Naturally Occurring Compounds on Fumonisin Production and fum Gene Expression in *Fusarium verticillioides*. *Agronomy*, 11(6): 1060. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061060>
- Flores-Aguilar, E. & Flores-Rivera, E.P. (2018). Estabilidad de antocianinas, fenoles totales y capacidad antioxidante de bebidas de maíz morado (*Zea mays* L.) y uña de gato (*Uncaria tomentosa* sp). *Información Tecnológica*, 29(2): 175-184. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200175>
- Flores, J. M. (2024). Control *in vitro* de *Fusarium verticillioides* mediante extractos vegetales adicionados con carbón activado y nano partículas de hidróxido de silicio. (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro). <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/49854>
- Gallegos-Flores, P. I., Delgadillo-Ruiz, L., Bañuelos-Valenzuela, R., Echavarría-Chairez, F., Valladares-Carranza, B., & Meza-López, C. (2022). Inhibition of bacterial mobility by terpenoid compounds and plant essential oils. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(1). <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3914>
- Luna, R. K. Y. (2011). Variabilidad en el contenido de antocianinas y proantocianidinas en granos de maíz azul y rojo. (Tesis de licenciatura. Departamento de ingeniería agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo). 63p.
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27 (12): 1254-1255. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.27.12.1254>
- Marrez, D.A. & Ayes, A.M. (2022). Mycotoxins: The threat to food safety. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(1): 353-372. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.80490.3987>
- Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., & Tuñón, M. J. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria*, 17(6): 271-278. https://www.researchgate.net/publication/237359143_Los_flavonoides_propiedades_y_acciones_antioxidantes
- Moreno-Limón, S., González-Solís, L. N., Salcedo-Martínez, S. M., Cárdenas-Ávila, M. L., & Perales-Ramírez, A. (2011). Efecto antifúngico de extractos de gobernadora (*Larrea tridentata* L.) sobre la inhibición *in vitro* de *Aspergillus flavus* y *Penicillium* sp. *Polibotánica*, (32): 193-205. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682011000200012&lng=es&tlng=es
- Ochoa-Fuentes, Y. M., Cerna-Chávez, E., Landeros-Flores, J., Hernández-Camacho, S., & Delgado-Ortiz, J. C. (2012). Evaluación *in vitro* de la actividad antifúngica de cuatro extractos vegetales metanólicos para el control de tres especies de *Fusarium* spp. *Phyton* (Buenos Aires), 81(1): 69-73. https://www.revistaphyton.fund-romuloraggio.org.ar/vol81/9-OCHOA_FUENTES.pdf
- Porras-Bautista, O. O. (2024). Plagas y enfermedades del cultivo de maíz con énfasis en *Fusarium* spp. en el Valle del Mezquital, Hidalgo. (Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro). <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/49844>

- Pilu, R., Cassani, E., Sirizzotti, A., Petroni, K., & Tonelli, C. (2011). Effect of flavonoid pigments on the accumulation of fumonisin B1 in the maize kernel. *Journal of Applied Genetics*, 52: 145-152. <https://doi.org/10.1007/s13353-010-0014-0>
- Ramírez-García, O., Salinas-Moreno, Y., Santillán-Fernández, A., & Sumaya-Martínez, M. T. (2022). Screening antioxidant capacity of Mexican maize (*Zea mays* L.) landraces with colored grain using ABTS, DPPH and FRAP methods. *Cereal Research Communications* 50: 1075-1083. <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00221-6>
- Rosas-Jauregui, I. A., Hernandez-Castillo, F. D., Palomo-Ligas, L., Martínez-Alemán, S. R., Ascacio-Valdés, J. A. y Rodríguez-Herrera, R. (2021) «Polifenoles de diferentes fuentes vegetales y su efecto in vitro contra patógenos del garbanzo», *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. México, ME, 12(8), pp. 1415–1427. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2742>
- Salinas Moreno, Y., Hernández Martínez, V., Trejo Téllez, L. I., Ramírez Díaz, J. L., & Iñiguez Gómez, O. (2017a.). Composición nutricional y de compuestos bioactivos en tortillas de poblaciones nativas de maíz con grano azul/morado. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(7): 1483-1496. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.525>
- Salinas-Moreno, Y., García-Salinas, C., Ramírez-Díaz, J. L., & Alemán-de la Torre, I. (2017b.). Phenolic Compounds in Maize Grains and Its Nixtamalized Products. In: Marcos Soto-Hernandez, Mariana Palma-Tenango and Maria del Rosario Garcia-Mateos (Eds.) Phenolic Compounds - Natural Sources, Importance and Applications. Chapter 8. Published by *Intech*. 215-232 pags. <http://dx.doi.org/10.5772/66893>
- Salinas-Moreno, Y., Ramírez-Díaz, J. L., Alemán-de la Torre, I., Bautista-Ramírez, E., & Ledesma-Miramontes, A. (2021). Evaluación de dos procedimientos de medición de color en granos de maíces pigmentados. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 12(7):1297-1303, <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2276>
- Singleton, V.L., & Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16: 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Schofield, P., Mbugua, D.M. & Pell, A.N. (2001). Analysis of condensed tannins: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 91 (1-2): 21-40. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00228-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00228-0)
- Schöneberg, T., Kibler, K., Sulyok, M., Musa, T., Bucheli, T. D., Mascher, F., & Vogelgsang, S. (2018). Can plant phenolic compounds reduce *Fusarium* growth and mycotoxin production in cereals? *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(12): 2455-2470. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1538570>
- Sumczynski, D., Kotàsková, E., Orsavová, J., & Valášek, P. (2017). Contribution of individual phenolics to the antioxidant activity and *in vitro* digestibility of wild rice (*Zizania Aquatica* L.). *Food Chemistry*, 218: 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.060>
- Uriás-Orona, V., Basilio-Heredia, J., Muy-Rangel, D., & Niño-Medina, G. (2016). Ácidos fenólicos con actividad antioxidante en salvado de maíz y salvado de trigo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(7): 43-50. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282016000100005&lng=es
- Venturini, G., Babazadeh, L., Casati, P., Pilu, R., Salomoni, D., & Toffolatti, S. L. (2016). Assessing pigmented pericarp of maize kernels as possible source of resistance to *Fusarium* ear rot, *Fusarium*

- spp. infection and fumonisin accumulation. *International Journal of Food Microbiology*, 227: 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.03.022>
- Villa-Martínez, A., Pérez-Leal, R., Morales-Morales, H. A., Basurto-Sotelo, M., Soto-Parra, J. M., & Martínez-Escudero, E. (2015). Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*, 64(2): 194-205. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>
- Wallace, T. C., & Giusti, M. M. (2010). Evaluation of parameters that affect the 4-dimethylaminocinnamaldehyde assay for flavanols and proanthocyanidins. *Journal of Food Science*, 75(7): C619-C625. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01734.x>
- Yu, Y., Li, Y., Zhang, Q., Zha, Y., Lu, S., Yang, Y., Li, P., & Zhou, Y. (2022). Colorimetric immunoassay via smartphone based on Mn²⁺-Mediated aggregation of AuNPs for convenient detection of fumonisin B1. *Food Control*, 132: 108481. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108481>
- Zacamo-Velázquez, N. Y., Ireta-Moreno, J., Salinas-Moreno, Y., Gómez-Rodríguez, V. M., Ramírez-Vega, H., & Martínez-Loperena, R. (2023). Variabilidad morfológica/patogénica de *Fusarium verticillioides* en la Ciénega/Chapala, México y evaluación de técnicas de inoculación. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1): 49679. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v34i1.49679>
- Zheng, Y., Zhao, B., Zhang, H., Jia, H., & Wu, M. (2020). Colorimetric aptasensor for fumonisin B1 detection by regulating the amount of bubbles in closed bipolar platform. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 877: 114584. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114584>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Valorización de pellets combustibles usando aserrín de 23 especies de maderas mexicanas

Valorization of fuel pellets using sawdust from 23 Mexican species

M.A. Ramírez-Ramírez¹, A. Carrillo-Parra², F. Ruiz-Aquino³, C. Luján-Álvarez⁴, J.J. Hernández-Solís⁵, N. Carrillo-Ávila⁶, L.F. Pintor-Ibarra¹, J.G. Rutiaga-Quiñones^{1*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Av. Fco. J. Múgica s/n, Col. Felicitas del Rio, Morelia, Michoacán, C.P. 58040, México.

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Boulevard del Guadiana 501, Ciudad Universitaria, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

³ Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Av. Universidad s/n, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, C.P. 68725, México.

⁴ Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Carretera km 2.5 Delicias, Chihuahua, C.P. 33000, México.

⁵ Tecnológico Nacional de México – Campus Instituto Tecnológico de la Zona Maya, Carretera Chetumal – Escárcega km 21.5, Ejido Juan Sarabia, Quintana Roo, C.P. 77695, México.

⁶ Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, San Martinito, Carretera Federal México – Puebla km 56.5, San Martinito, Municipio de Tlahuapan, Puebla, C.P. 74100, México.

*Correspondencia: rutiaga@umich.mx (José Guadalupe Rutiaga-Quiñones)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1829>

Recibido: 29 de enero de 2025; Aceptado: 07 de marzo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Rubén Francisco González-Laredo

Resumen

Se ha observado un deterioro medioambiental debido al crecimiento económico enlazado al respectivo consumo de combustibles fósiles a nivel mundial, pero también se han desarrollado investigaciones sobre biocombustibles alternativos para intentar reducir el uso de energía fósil. En este sentido, la biomasa lignocelulósica, como energía renovable, juega un rol importante para la generación de biocombustibles sólidos densificados, procurando disminuir la utilización de hidrocarburos fósiles y promoviendo una energía ecoeficiente. En el presente estudio se elaboraron pellets combustibles con 23 muestras de aserrín obtenido en diferentes empresas forestales en 5 estados de la República Mexicana. Se realizó una evaluación física, mecánica y energética de los

pellets obtenidos. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las evaluaciones realizadas. Los resultados más relevantes variaron como sigue: contenido de humedad (2.69 – 8.73 %), densidad de partícula (1.08 – 1.32 g/cm³), densidad a granel (532 – 668 kg/m³), índice de resistencia al impacto (100 a 250 %), resistencia a la compresión (178 – 1542 N/mm), poder calorífico (15.42 – 20.85 MJ/kg) y densidad energética (9.32 – 13.07 GJ/m³). De acuerdo con la evaluación física, mecánica y energética, los pellets elaborados con las diferentes muestras de aserrín tienen en general buena calidad para su uso residencial local o industrial.

Palabras clave: madera de pino, maderas latifoliadas, biocombustibles densificados, biomasa residual, bioenergía

Abstract

Environmental deterioration has been observed due to economic growth linked to the global consumption of fossil fuels. However, research has also focused on developing alternative biofuels to reduce fossil energy consumption. In this context, lignocellulosic biomass plays a crucial role as a renewable energy in producing densified solid biofuels, promoting reduced dependence on fossil fuels, and supporting cleaner energy initiatives. In the current study, fuel pellets were made using 23 samples of sawdust collected from various forest mills across five states in Mexico. A physical, mechanical and energetic assessment of the obtained pellets was conducted, revealing significant statistical differences in the evaluations. The most notable results were as follows: moisture content ranged from 2.69 to 8.73 %; particle density varied from 1.08 to 1.32 g/cm³; bulk density was found to be between 532 and 668 kg/m³; impact strength index ranged from 100 to 250 %, compressive strength values varied from 178 to 1542 N/mm; calorific value was between 15.42 and 20.85 MJ/kg; and energy density ranged from 9.32 to 13.07 GJ/m³). Based on the physical, mechanical and energetic evaluations, the pellets produced from the diverse sawdust samples appear suitable for local residential or industrial use.

Keywords: Pine wood, hardwoods, densified biofuels, residual biomass, bioenergy

1. Introducción

En recientes décadas se ha observado un deterioro ambiental derivado del acelerado crecimiento económico con el respectivo consumo de energía fósil a nivel mundial (García *et al.*, 2016; Adebayo *et al.*, 2021; Yuping *et al.*, 2021), lo que también ha propiciado investigaciones y desarrollos sobre biocombustibles alternativos buscando la reducción del uso de combustibles fósiles (Østergaard *et al.*, 2020; Baasch, 2021). Estas acciones promueven el interés sobre la aplicación y adopción de prácticas y tecnologías más amigables, sustentables, respetuosas, limpias y renovables con el medio ambiente (Amador-Hernández, 2015; Rennkamp *et al.*, 2017; Qazi *et al.*, 2019).

En ese escenario, los recursos renovables, como la biomasa, destaca como fuente abundante y versátil, que puede tener alto significado en el proceso de cambio hacia una matriz energética más ecológica, e inversiones en este campo de las energías renovables podrían ayudar en la solución de esta problemática (Moran *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017). La biomasa, referida como la materia prima orgánica no fosilizada proveniente de animales y plantas, supone una fuente renovable de energía,

ya que se puede transformar en los llamados biocombustibles (Velázquez-Martí, 2018). Existen diversas fuentes y tipos de biomasa generados principalmente de las actividades de producción marina, agrícola y forestal, y en esencia se pueden distinguir dos grandes grupos: biomasa derivada de plantaciones energéticas y la biomasa procedente de residuos o restos de las actividades antropogénicas (Velázquez-Martí, 2018). Las diferentes fuentes de biomasa tienen potencial para ser transformada y generar biocombustibles gaseosos, líquidos o sólidos (Velázquez-Martí, 2018).

La biomasa forestal usada sustentablemente puede generar energía neutra en carbono y puede ser potencialmente una solución para reemplazar a los combustibles fósiles (Hiloidhari *et al.*, 2019; Sulaiman *et al.*, 2020). Es conocido que a lo largo del proceso del procesamiento de la madera se generan grandes cantidades de subproductos lignocelulósicos, como aserrín, corteza y viruta. Además, existen algunas evidencias de que este material puede usarse para la generación de biocombustibles sólidos densificados (Morales-Máximo *et al.*, 2020; Bandara *et al.*, 2021) y al emplearlos en procesos de combustión pueden promover estrategias para la reducción de compuestos responsables del efecto invernadero (Morales-Máximo *et al.*, 2022; Nwabueze y Leggett, 2024).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue la elaboración de biocombustibles sólidos densificados, *i.e.* pellets, usando aserrín de 23 especies de madera derivado del proceso de aserrío y recolectado en cinco estados de la República Mexicana. Este material de estudio fue previamente caracterizado para conocer sus propiedades físicas, químicas y energéticas (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020; Chávez-Rosales *et al.*, 2021; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021) y se ha reportado la elaboración y caracterización de sus briquetas bicomcombustibles (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021; 2022). Los resultados obtenidos no solamente contribuyen al conocimiento científico de estos pellets, sino que también promoverían su uso local, ayudando a mitigar la degradación medioambiental, e impactando en la gestión sostenible de los recursos lignocelulósicos.

2. Materiales y métodos

Veintitrés muestras de aserrín, sin corteza y sin tratamiento químico, derivado del procesamiento primario de la madera se recolectaron como donación en varias compañías y ejidos forestales en cinco estados mexicanos: Quintana Roo [Ejido Noh-Bec (19°08'26" N, 88°09'23" O), Ejido Petcacab (19°17'00" N, 88°13'21" O) y Ejido Tres Garantías (18°11'21" N, 88°59'11" O)], Chihuahua [El Largo (29°41'12" N, 108°17'02" O), Agua azul (26°51'00" N, 106°56'24" O), Grupo Gazo (26°56'09" N, 105°38'12" O) y Multimaderas (26°55'41" N, 105°41'45" O)], Michoacán [Maderería Zamora (18°45'39" N, 103°11'21" O), Maderas Preciosas Don Jesús (18°48'08" N, 102°55'40" O) y Lázaro Cárdenas (18°44'34" N, 102°46'52" O)], Durango [Grupo Sezarik (25°03'15" N, 105°25'07" O), Maderas y Tarimas Alba (25°05'50" N, 105°26'44" O), Vencedores (24°25'41" N, 105°42'21" O), La Cañita (24°27'44" N, 106°01'32" O) y Pueblo Nuevo (23°46'36" N, 105°21'58" O)], y Oaxaca [Productora Comunal de Muebles Ixtlán (17°19'26" N, 96°28'37" O) y Aserradero Mapsi (17°19'25" N, 96°29'02" O)]. En la Tabla 1 se muestran datos sobre las maderas en proceso en las diferentes industrias y de las cuales se obtuvo el aserrín en orden de recolección. Para el caso de las maderas de pino y encino, no fue posible hacer una separación por especies debido a que la madera se transporta mezclada del bosque a la industria forestal. Para cada caso, aproximadamente 50 kg de aserrín fueron colectados. De cada pila de aserrín se eligió una al azar y de ella se tomaron muestras de aserrín de la parte alta, media y baja.

2.1 Producción de pellets

La humedad inicial de las muestras de aserrín recolectado varió ampliamente con valores reportados de 6.0 a 75.2 % (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020), pero previo al proceso de densificación, las muestras se dejaron secar al aire libre, hasta un contenido de humedad de aproximadamente 12 %. Todos los tipos de aserrín se usaron sin hacer separación por tamaño de partícula, debido a que un estudio previo con esta misma biomasa concluye que la granulometría de estos materiales es adecuada para la elaboración de biocombustibles sólidos densificados (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). Se han reportado también resultados sobre las propiedades de briquetas obtenidas con estos mismos materiales (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021; 2022). Los pellets se produjeron utilizando una peletizadora industrial de discos planos (Marca ZSLP-R300), con canales de 8 mm de longitud y 6 mm de diámetro con una capacidad de 250 a 300 kg/h. Una vez enfriados los pellets fueron colocados en bolsas de plástico selladas herméticamente, hasta ejecutar los ensayos de caracterización.

2.2 Evaluación física, mecánica y energética de los pellets

Se determinó la humedad de los pellets en un horno de secado (Binder GmbH, model BD 260, Tuttlingen, Germany) por triplicado (EN 18134-3, 2015). De cada muestra de pellets, según su procedencia, se tomaron aleatoriamente 20 pellets para medir su diámetro y longitud usando un vernier (Sgarbossa *et al.*, 2015), además se midió su masa para calcular la densidad de partícula (Kocer y Kurklu, 2020). La densidad a granel se determinó por triplicado (EN ISO 17828, 2015).

El índice de resistencia al impacto se obtuvo a partir del número total de piezas de pellets producidas después de dejar caer al suelo cada uno de los 20 pellets, por procedencia, cuatro veces desde 1.8 m de altura (ASTM D440-68, 2007). La resistencia a la compresión en los pellets se efectuó por triplicado en una máquina universal (INSTRON 300 DX, Instron, Norwood, Ma, USA), con una capacidad de carga de 300 kN. Cada pellet se colocó horizontalmente en el probador de compresión, luego se aplicó la carga a una velocidad constante de 0.305 mm/min hasta que el pellet falló por agrietamiento (ASTM D2166-85, 2008).

El análisis proximal en los pellets sin humedad, comprendió la determinación por triplicado de cenizas (UNE-EN ISO 18122, 2023), material volátil (ASTM E872-82, 2013) y carbono fijo; este último fue calculado por diferencia de 100 menos contenido de cenizas y material volátil (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021). El poder calorífico superior de los materiales densificados se evaluó por triplicado (UNE-EN 14918, 2011), usando un calorímetro semiautomático (LECO AC600, MI, USA). La densidad energética de los pellets se determinó multiplicando su densidad por su poder calorífico.

2.3 Análisis estadístico

Para cada determinación, se efectuó un análisis de varianza y una prueba Tukey y los datos se analizaron con un nivel de confianza estadística de 95 %, usando el programa Statgraphics Centurion (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, USA). Los resultados obtenidos se presentan con el valor medio y su desviación estándar ($\pm$).

3. Resultados y discusión

3.1 Evaluación física de los pellets

En la Tabla 1 se observan los resultados del contenido de humedad de los pellets, que variaron de 2.69 a 8.73 %, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En concordancia con la norma ISO 17225-2 (2021), los resultados aquí obtenidos están por debajo del valor recomendado, por lo que podría garantizarse buena combustión (Hansen *et al.*, 2009) debido a que un menor contenido de humedad incrementa el poder calorífico de los combustibles (Aguilar-Sánchez *et al.*, 2022). Para pellets de pino se ha reportado 4.8 % de humedad (Núñez-Retana *et al.* 2019) y otros estudios reportan diversos valores en pellets elaborados con diversas biomásas lignocelulósicas (8.41 – 8.68 %) (Acampora *et al.*, 2021), (7.9 – 11.1 %) (Bandara *et al.*, 2021), (7.7 – 10.1 %) (Ilari *et al.*, 2021).

Tabla 1. Nombre de las maderas, procedencia y humedad de los pellets obtenidos

Table 1. Name of woods, origin and moisture content of pellets

Clave	Nombre científico	Nombre común	Procedencia	Contenido de humedad (%)
1	<i>Swartzia cubensis</i> (Britt. and Willson) Sandl.	Kátalox	Quintana Roo	8.73 ± 0.01 ^m
2	<i>Lysiloma latisiliquum</i> L. Benth.	Tzalam		6.37 ± 0.01 ⁱ
3	<i>Manilkara zapota</i> (L.) v. Royen	Chicozapote		5.21 ± 0.03 ^g
4	<i>Swietenia macrophylla</i> King	Caoba		3.43 ± 0.00 ^b
5	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Chihuahua	4.63 ± 0.03 ^e
6	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.04 ± 0.01 ^c
7	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.89 ± 0.02 ^h
8	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.58 ± 0.02 ^{de}
9	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Michoacán	4.78 ± 0.01 ^e
10	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.48 ± 0.05 ^h
11	<i>Pinus</i> spp.	Pino		2.69 ± 0.01 ^a
12	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.77 ± 0.04 ^h
13	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.54 ± 0.02 ^d
14	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Durango	6.68 ± 0.05 ^j
15	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.48 ± 0.05 ^j
16	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.43 ± 0.03 ⁱ
17	<i>Quercus</i> spp.	Encino		5.08 ± 0.01 ^f
18	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.59 ± 0.03 ^{de}
19	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.87 ± 0.02 ^k
20	<i>Quercus</i> spp.	Encino		6.58 ± 0.01 ^j
21	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.02 ± 0.04 ⁱ
22	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Oaxaca	7.17 ± 0.03 ^l
23	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.84 ± 0.03 ^h

Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

El diámetro de los pellets varió de 5.81 a 6.00 mm (Tabla 2), observándose diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). El diámetro de la matriz del equipo es precisamente de 6.00 mm, pero suele haber ciertas variaciones. Por ejemplo, usando la misma peletizadora, se han reportado diámetros de 6.03 a 6.05 mm en pellets de aserrín de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018) y de 5.80 a 6.14 mm en pellets elaborados con aserrín de diversas biomásas lignocelulósicas (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). El diámetro de los pellets aquí producidos satisface el requerimiento de la norma UNE EN 14961-6 (2012) de tener un valor de 6 ± 1 mm (Tabla 2).

La longitud de los pellets varió de 10.74 a 26.29 mm (Tabla 2) con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) que corresponde a los pellets de maderas de pino; los otros resultados de las maderas tropicales y de los encinos se encuentran dentro de este rango. Valores de 20.44 y 24.65 mm han sido reportados para pellets de aserrín de pino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). En el caso del aserrín de las maderas tropicales, los resultados variaron de 15.48 a 20.44 mm; mientras que se han reportado longitudes de 13.17 a 17.37 mm para pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Para los encinos, los valores aquí encontrados fueron de 15.77 y 25.46 mm; para pellets de aserrín de encino se han reportado longitudes de 26.23 y 33.69 mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Es común que en el proceso de densificado se obtengan diferentes longitudes (Michelena y Martín, 2008) y en este estudio los valores obtenidos cumplen con los requerimientos para pellets clase D06, según la norma UNE EN 14961-2 (2012).

El peso de los pellets varió de 0.33 a 0.88 g (Tabla 2), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Como era de esperarse, los resultados más bajos de peso corresponden a los pellets de menor longitud. Valores de 0.72 a 1.79 g se han reportado para pellets elaborados con diferentes tipos de biomasa lignocelulósica (Carrillo-Parra *et al.*, 2021).

La densidad de partícula varió de 1.08 a 1.32 g/cm³ (Tabla 1), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En los pellets de aserrín de pino, la densidad de partícula promedio fue de 1.17 g/cm³ (1.08 – 1.22 g/cm³), ligeramente menor al promedio de 1.25 g/cm³ reportada para pellets de aserrín de pino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Mientras que para los pellets de encino el valor promedio fue de 1.20 g/cm³ (1.15 – 1.25 g/cm³), cercano a 1.29 g/cm³ reportado para pellets de aserrín de encino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Para los pellets de aserrín de maderas tropicales, los resultados variaron de 1.14 a 1.32 g/cm³ con valor promedio de 1.21 g/cm³. Finalmente, la densidad de partícula de los pellets es cercana a los valores reportados (1.12 – 1.13 g/cm³) en el manual de pellets (Thek y Obernberger, 2012), los que se encuentran dentro del rango sugerido por Mostafa *et al.* (2019) que va de 1.0 a 1.4 g/cm³.

La densidad a granel varió de 532 a 668 kg/m³ con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), como se muestra en la Tabla 2. En algunas investigaciones se han dado a conocer diversos valores de densidad a granel para pellets de madera de pino. Por ejemplo, se han reportado valores de 574 a 677 kg/m³ (Sher *et al.*, 2017) y de 690 kg/m³ (García *et al.*, 2018). En general, para pellets de madera Bala-Litwiniak y Radomiak (2019) encontraron una densidad de 590 kg/m³, mientras que Park *et al.* (2019) reportan un valor de 667 kg/m³ y Stolarski *et al.* (2022) dan a conocer un valor de 569 kg/m³. Solamente 17 de las 23 muestras de pellets aquí estudiados, cuya densidad a granel es superior a 600 kg/m³, cumplen con la recomendación de la norma DIN 51731 (1996). La densidad a granel es inherente a la densidad básica del material lignocelulósico, humedad y tamaño de partícula, así como de otros aspectos relacionados con el proceso de fabricación como la presión aplicada y la temperatura alcanzada durante el densificado, que juega un rol importante en el manejo de estos biocombustibles densificados, así como en el costo logístico (Michelena y Martín, 2008).

Tabla 2. Evaluación física de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica**Table 2.** Physical evaluation of pellets produced from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	D (mm)	L (mm)	P (g)	DP (g/cm ³)	DG (kg/m ³)
1	Quintana Roo	5.81 ± 0.02 ^f	20.44 ± 9.51 ^{cdef}	0.62 ± 0.31 ^{de}	1.14 ± 0.08 ^{fgh}	593 ± 8.59 ^d
2		5.90 ± 0.00 ^e	15.48 ± 4.62 ^{fgh}	0.52 ± 0.18 ^{ef}	1.21 ± 0.07 ^{bcd}	643 ± 3.67 ^l
3		5.90 ± 0.00 ^e	20.11 ± 8.35 ^{bcd}	0.73 ± 0.33 ^{abc}	1.32 ± 0.07 ^a	668 ± 10.30 ^m
4		5.92 ± 0.06 ^d	16.42 ± 6.22 ^{fgh}	0.53 ± 0.24 ^{efg}	1.15 ± 0.09 ^{efg}	573 ± 8.58 ^b
5	Chihuahua	5.92 ± 0.05 ^d	11.28 ± 2.67 ^{klm}	0.34 ± 0.09 ^{ij}	1.10 ± 0.06 ^{hi}	590 ± 6.67 ^{c,d}
6		5.93 ± 0.07 ^{cd}	10.47 ± 2.97 ^m	0.33 ± 0.11 ^j	1.12 ± 0.07 ^{ghi}	601 ± 3.06 ^{d,e}
7		5.90 ± 0.02 ^e	11.90 ± 2.68 ^{klm}	0.39 ± 0.09 ^{hij}	1.20 ± 0.08 ^{cd}	606 ± 4.23 ^{e,f}
8		5.90 ± 0.00 ^e	10.74 ± 1.99 ^{lm}	0.35 ± 0.07 ^{ij}	1.18 ± 0.07 ^{def}	618 ± 11.60 ^{f,g,h,i}
9	Michoacán	5.92 ± 0.09 ^{cd}	13.58 ± 2.51 ^{hij}	0.44 ± 0.09 ^{fgh}	1.16 ± 0.05 ^{efg}	630 ± 2.69 ^{i,j,k}
10		5.93 ± 0.09 ^c	17.58 ± 3.91 ^{bcde}	0.58 ± 0.12 ^{cd}	1.20 ± 0.04 ^{cde}	614 ± 5.26 ^{f,g,h}
11		6.00 ± 0.00 ^{ab}	12.22 ± 2.20 ^{ijkl}	0.40 ± 0.08 ^{hi}	1.14 ± 0.06 ^{gh}	622 ± 1.97 ^{h,i}
12		6.00 ± 0.00 ^{ab}	13.00 ± 3.16 ^{ijk}	0.43 ± 0.12 ^{gh}	1.15 ± 0.08 ^{fg}	609 ± 7.32 ^{e,f,g}
13		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.60 ± 5.79 ^{ghi}	0.54 ± 0.22 ^{ef}	1.21 ± 0.07 ^{bcd}	639 ± 2.69 ^{k,l}
14		6.00 ± 0.00 ^{ab}	26.29 ± 7.90 ^a	0.88 ± 0.27 ^a	1.18 ± 0.05 ^{def}	612 ± 7.82 ^{e,f,g}
15		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.73 ± 5.28 ^{fgh}	0.54 ± 0.19 ^{de}	1.20 ± 0.08 ^{bcd}	635 ± 3.56 ^{j,k,l}
16		6.08 ± 0.16 ^a	21.38 ± 6.08 ^{ab}	0.67 ± 0.22 ^{bc}	1.08 ± 0.06 ⁱ	532 ± 2.24 ^a
17		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.77 ± 4.16 ^{efgh}	0.51 ± 0.15 ^{de}	1.15 ± 0.05 ^{fg}	581 ± 2.66 ^{b,c}
18		6.00 ± 0.00 ^{ab}	16.73 ± 4.57 ^{defg}	0.58 ± 0.17 ^{cde}	1.21 ± 0.06 ^{bcd}	618 ± 5.97 ^{f,g,h}
19		6.00 ± 0.00 ^{ab}	21.14 ± 7.18 ^{abc}	0.75 ± 0.28 ^{ab}	1.25 ± 0.06 ^b	627 ± 16.37 ^{i,j,k}
20		6.00 ± 0.00 ^{ab}	25.46 ± 8.94 ^a	0.88 ± 0.33 ^{ab}	1.22 ± 0.05 ^{bc}	626 ± 14.07 ^{i,j}
21		6.00 ± 0.00 ^{ab}	11.67 ± 1.89 ^{klm}	0.39 ± 0.07 ^{hi}	1.19 ± 0.07 ^{cde}	590 ± 6.17 ^{c,d}
22	Oaxaca	5.92	11.35	0.38	1.21	613

	$\pm 0.08^{cd}$	$\pm 1.55^{klm}$	$\pm 0.05^{hij}$	$\pm 0.06^{bc}$	$\pm 5.22^{f,g,h}$
23	5.99	14.47	0.50	1.22	619
	$\pm 0.06^b$	$\pm 4.30^{hij}$	$\pm 0.16^{efg}$	$\pm 0.06^{bc}$	$\pm 8.54^{g,h,i}$

D = diámetro; L = longitud; P = peso; DP = diámetro de partícula; DG = densidad a granel. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

3.2 Evaluación mecánica de los pellets

El índice de resistencia al impacto varió de 100 a 215 % (Tabla 3), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Una investigación realizada en pellets de aserrín de pino da a conocer índices de 96.67 a 125 % (Núñez-Retana *et al.*, 2019), mientras que para maderas tropicales se encontraron valores de 177 a 160 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

Tabla 3. Evaluación mecánica de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica

Table 3. Mechanical evaluation of pellets made from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	IRI (%)	RC (N/mm)
1	Quintana Roo	100.00 ± 19.86^i	1542 ± 413.72^a
2		190.00 ± 75.39^{abc}	629 ± 133.05^{ab}
3		172.50 ± 67.81^{abcde}	861 ± 21.13^{ab}
4		133.75 ± 47.48^{fgh}	294 ± 30.51^{efg}
5	Chihuahua	176.25 ± 76.72^{abcde}	178 ± 9.54^i
6		166.25 ± 72.67^{cdefg}	220 ± 46.58^{ghi}
7		207.50 ± 78.26^{ab}	258 ± 29.74^{fgh}
8		182.50 ± 71.22^{abcd}	206 ± 21.73^{hi}
9	Michoacán	160.50 ± 76.39^{cdefg}	312 ± 77.16^{ef}
10		151.25 ± 56.47^{cdefg}	870 ± 170.99^{ab}
11		215.00 ± 79.63^a	208 ± 62.04^{ghi}
12		175.00 ± 76.95^{abcde}	293 ± 108.32^{efg}
13		168.75 ± 72.49^{abcde}	460 ± 19.50^{bc}
14	Durango	142.50 ± 43.75^{defg}	690 ± 33.00^{ab}
15		186.25 ± 79.25^{abcd}	301 ± 76.00^{efg}
16		167.50 ± 59.11^{abcde}	358 ± 6.56^{cde}
17		136.25 ± 61.49^{gh}	423 ± 35.25^{bcd}
18		115.00 ± 46.17^{hi}	334 ± 96.06^{def}
19		143.75 ± 59.53^{efg}	351 ± 10.53^{def}
20		147.50 ± 58.99^{defg}	509 ± 69.42^{bcd}
21		173.75 ± 78.42^{bcdef}	347 ± 29.46^{cdef}
22	Oaxaca	181.25 ± 83.06^{abcde}	222 ± 41.31^{ghi}
23		160.00 ± 75.39^{cdefg}	317 ± 70.95^{ef}

IRI = índice de resistencia al impacto; RC = resistencia a la compresión. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

Las diferencias podrían atribuirse a la densidad de las maderas (Michelena y Martín, 2008). Por los índices aquí encontrados, se puede afirmar que los pellets pueden considerarse de buena calidad, ya que la norma ASABE (2006) refiere que pellets con índice mayor a 97.5 % son considerados biocombustibles de alta calidad por su buena adhesión, lo que permitiría su buen manejo y transportación; al contrario, podría esperarse mal manejo por desintegración del material densificado (Michelena y Martín, 2008).

Los resultados de la resistencia a la compresión (Tabla 3) presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Además de la longitud, diámetro y densidad de partícula, la resistencia a la compresión es otro de los criterios relevantes en la caracterización técnico-funcional de los pellets (Sette *et al.*, 2018). Los resultados de la resistencia a la compresión variaron de 178 a 1542 N/mm, y para pellets de aserrín de pino se han encontrado valores de 537 a 786 N/mm, mientras que para pellets de aserrín de encino se han dado a conocer resultados que van de 1142 a 1792 N/mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Estas diferencias pudieran explicarse por el tiempo y temperatura alcanzados en el proceso de densificación de los materiales.

3.2 Evaluación energética de los pellets

El contenido de cenizas varió de 0.40 a 3.85 % con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) como se aprecia en la Tabla 4. El contenido de sustancias inorgánicas en los pellets de aserrín de pino es menor a 1.0 %, mientras que en los de encino y de maderas tropicales se encontraron valores mayores, lo que es consistente con estudios recientes (Carrillo-Parra *et al.*, 2018; Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). En pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales, se han reportado resultados de cenizas de 2.41 a 3.22 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2018) que son comparables con los aquí obtenidos. Tomando en consideración el esquema de certificación sobre la calidad de los pellets elaborados con madera, los aquí obtenidos, cuyo valor de contenido de cenizas sea ≤ 0.7 % podrían alcanzar la calidad A1, los de contenido ≤ 1.2 % serían calidad A2 y los de ≤ 2.0 % podrían ser calidad B (Manual ENplus, 2015), esto en caso de exportación de los pellets. Sin embargo, visualizando el consumo local y sobre todo el rural, los pellets obtenidos podrían ser usados y las cenizas obtenidas podrían tener aplicación en el compostaje de materiales lignocelulósicos, evaluando la presencia de elementos pesados y su toxicidad.

El material volátil de los pellets varió de 80.94 a 92.47 % (Tabla 4) con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En el caso de los pellets de maderas tropicales, los resultados variaron de 80.94 a 85.78 %, mayores a los reportados (72 – 79 %) para pellets de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Con relación a los pinos, el contenido de material volátil varió de 83.07 a 92.47 %, con cierta similitud a los resultados encontrados en pellets de aserrín de pino (83.9 – 85.21 %) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Se estima que un valor de 82.8 % de material volátil es adecuado para pellets con fines comerciales (Chen *et al.*, 2015), por lo que de acuerdo con los resultados aquí obtenidos prácticamente todos los pellets cumplen con este parámetro. El material volátil es importante por su relación con los gases liberados en su combustión y afectan su desempeño y estabilidad física (Forero-Núñez *et al.*, 2015), siendo además un parámetro que se puede disminuir con un proceso de pirólisis controlado (Ruiz-Aquino *et al.*, 2019).

Tabla 4. Evaluación energética de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica**Table 4.** Energy evaluation of pellets produced from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	CE (%)	MV (%)	CF (%)	PC (MJ/kg)	DE (GJ/m ³)
1	Quintana Roo	2.18	81.86	15.96	17.68	10.48
		± 0.16 ^{abc}	± 0.94 ^h	± 0.81 ^a	± 0.46 ^{fghi}	± 0.41 ^{fghi}
2		3.85	80.94	15.21	16.84	10.84
		± 0.01 ^a	± 2.02 ^h	± 2.01 ^a	± 2.43 ^{ghij}	± 1.60 ^{efgh}
3		2.84	85.78	11.38	16.79	11.21
		± 0.25 ^{ab}	± 0.15 ^{fgh}	± 0.09 ^{abcd}	± 0.82 ^{ghij}	± 0.49 ^{defg}
4		2.73	85.39	11.88	16.25	9.32
		± 0.04 ^{ab}	± 1.05 ^{fgh}	± 1.02 ^{abc}	± 0.20 ^{ij}	± 0.18 ^k
5	Chihuahua	0.57	90.56	8.87	15.90	9.38
		± 0.26 ^{hij}	± 0.33 ^{ab}	± 0.59 ^{efgh}	± 0.43 ^{ij}	± 0.25 ^k
6		0.54	89.72	9.74	15.83	9.51
		± 0.13 ^{ij}	± 1.24 ^{abcd}	± 1.18 ^{cdef}	± 0.60 ⁱ	± 0.36 ^{ijk}
7		0.55	86.28	13.16	15.59	9.45
		± 0.13 ^{ij}	± 0.58 ^{efgh}	± 0.48	± 0.87 ⁱ	± 0.47 ^{jk}
8		0.62	83.07	16.31	19.38	11.98
		± 0.06 ^{ghi}	± 10.15 ^{defg}	± 1.19 ^{abc}	± 0.47 ^{abcde}	± 0.31 ^{abcd}
9	Michoacán	0.75	85.77	11.81	18.47	11.62
		± 0.06 ^{efg}	± 0.19 ^{fgh}	± 1.41 ^{abcd}	± 0.50 ^{cdefg}	± 0.35 ^{def}
10		0.40	90.67	8.93	19.78	12.14
		± 0.08 ⁱ	± 1.16 ^{ab}	± 1.13 ^{efgh}	± 0.99 ^{abcd}	± 0.70 ^{abcd}
11		0.56	89.91	9.54	18.81	11.70
		± 0.06 ^{ij}	± 1.17 ^{abc}	± 1.22 ^{defgh}	± 1.39 ^{cdef}	± 0.88 ^{de}
12		0.54	85.29	14.16	19.39	11.81
		± 0.09 ^{ij}	± 0.92 ^{gh}	± 1.00 ^{ab}	± 0.44 ^{bcde}	± 0.29 ^{bcde}
13		0.67	89.05	10.29	18.40	11.75
		± 0.06 ^{fgh}	± 1.26 ^{bcd}	± 1.20 ^{cdef}	± 0.55 ^{defg}	± 0.31 ^{bcde}
14	Durango	0.56	92.47	6.97	19.05	11.66
		± 0.03 ^{ij}	± 1.05 ^a	± 1.05 ^h	± 0.13 ^{bcdef}	± 0.21 ^{cde}
15		0.63	89.66	9.71	19.84	12.61
		± 0.05 ^{ghi}	± 0.82 ^{abcd}	± 0.77 ^{cdefg}	± 0.70 ^{abcd}	± 0.39 ^{ab}
16		0.90	88.95	10.15	19.53	10.39
		± 0.09 ^{cde}	± 1.16 ^{bcde}	± 1.24 ^{cdef}	± 0.48 ^{acbd}	± 0.29 ^{ghij}
17		2.65	88.32	9.02	19.75	11.47
		± 0.04 ^{ab}	± 1.09 ^{bcdefg}	± 1.07 ^{efgh}	± 0.16 ^{abc}	± 0.10 ^{defg}
18		0.82	91.96	7.22	20.36	12.58
		± 0.17 ^{ef}	± 0.84 ^a	± 0.80 ^{gh}	± 0.69 ^{ab}	± 0.53 ^{abc}
19		0.57	89.72	9.71	20.85	13.07
		± 0.02 ^{ij}	± 5.96 ^{bcdef}	± 1.95 ^{bcde}	± 0.21 ^a	± 0.46 ^a
20		1.22	89.13	9.66	18.09	11.31
		± 0.09 ^{bcd}	± 1.21 ^{bcde}	± 1.14 ^{cdef}	± 2.22 ^{efgh}	± 1.16 ^{defg}
21		0.83	90.65	8.52	16.32	9.64
		± 0.14 ^{def}	± 1.35 ^{ab}	± 1.50 ^{fgh}	± 0.74 ^{hij}	± 0.52 ^{ijk}
22	Oaxaca	0.85	88.38	10.45	16.73	10.26

	$\pm 0.13^{\text{def}}$	$\pm 0.95^{\text{bcdefg}}$	$\pm 0.82^{\text{cdef}}$	$\pm 0.33^{\text{ghij}}$	$\pm 0.20^{\text{ghijk}}$
23	1.20	87.95	10.84	15.42	9.56
	$\pm 0.06^{\text{bcd}}$	$\pm 4.00^{\text{cdefg}}$	$\pm 1.94^{\text{bcde}}$	$\pm 1.72^{\text{ij}}$	$\pm 1.18^{\text{hijk}}$

CE = cenizas; MV = material volátil; CF = carbono fijo; PC = poder calorífico; DE = densidad energética. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

El carbono fijo varió de 6.97 a 16.31 % con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Estos valores corresponden precisamente a las muestras de pellets elaborados con aserrín de pino (Tabla 4). Para los pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales, los valores variaron de 11.38 a 15.96 % (Tabla 4), y prácticamente se ubican en el rango reportado para pellets elaborados con aserrín de algunas especies tropicales (12 – 21 %) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Se han dado a conocer valores que van de 14.39 a 15.62 % en pellets de pino y de 15.15 a 17.37 % en pellets de encino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Estos últimos valores son mayores a los aquí encontrados en las muestras de pellets de encino. En conocido que este parámetro tiene singular importancia en el proceso de combustión promoviendo mayor generación térmica cuanto más alto es el contenido de carbono fijo (Onochie *et al.*, 2017).

El poder calorífico superior (Tabla 4), presenta diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), variando de 15.42 a 20.85 MJ/kg. En cuanto a las muestras de maderas tropicales, los resultados son ligeramente inferiores a los datos encontrados en pellets de aserrín de algunas maderas tropicales (17.8 – 19.64 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Con respecto a pellets de pino, se han publicado valores de 20.69 a 20.91 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Los valores aquí encontrados en los pellets de encino se ubican ligeramente por debajo de algunos datos reportados para pellets de aserrín de encino (19.98 – 20.38 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). El poder calorífico constituye un parámetro obligatorio ha determinar al margen de la materia prima o vía de obtención del biocombustible (Pinilla *et al.*, 2022). Es de suma importancia en biocombustibles densificados y pellets con poder calorífico superior a 16.5 MJ/kg sugerido por la norma ISO 17225-2 (2021), por lo que pudieran sugerirse para uso residencial o industrial.

La densidad energética de los pellets varió de 9.32 a 13.07 GJ/m³ con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), como se aprecia en la Tabla 4. En el caso de las maderas tropicales, los resultados variaron de 9.32 a 11.21 GJ/m³; para los pellets de pino, de 9.38 a 12.61 GJ/m³; y para los de encino, los valores fueron cercanos entre sí (11.31 – 11.47 GJ/m³). La mayor proporción de los hallazgos registrados en esta parte se encuentran por debajo del límite inferior (12.0 – 14.5 GJ/m³) que ha sido reportado para pellets de pino (Peng *et al.*, 2015; García *et al.*, 2018).

4. Conclusiones

Usando aserrín de 23 especies de maderas colectado en el proceso de aserrío en cinco estados de la República Mexicana se elaboraron pellets y se llevó a cabo su evaluación física, mecánica y energética. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las evaluaciones realizadas. La humedad de los pellets fue menor al valor recomendado, por lo que se esperaría buena combustión. Respecto a la densidad de partícula obtenida, los pellets son considerados de buena calidad. Aproximadamente el 74 % de los pellets presentan una densidad superior a 600 kg/m³, valor

sugerido por la norma DIN. De acuerdo a la evaluación mecánica, los pellets pueden ser considerados de buena calidad. Solamente el 21 % de las muestras de pellets presentan un contenido de cenizas superior a 2.0 %, por lo que resto de ellos pudiera alcanzar al menos la clasificación B, de acuerdo al Manual ENplus. Por los resultados de material volátil, los pellets pueden considerarse aptos para uso comercial. Se encontró que el 74 % de los pellets tiene un poder calorífico mayor a 16.5 MJ/kg, recomendado por la norma ISO. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, los pellets pudieran tener aplicación local, y podrían promover la disminución de la degradación medioambiental e impactar en la gestión sostenible de los recursos o biomasa lignocelulósica localmente.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización, J.G.R.Q.; investigación, M.A.R.R.; recursos, J.G.R.Q., A.C.P., F.R.A., C.L.A., J.J.H.S., y N.C.A.; redacción-redacción del borrador original, M.A.R.R., A.C.P. y J.G.R.Q.; redacción-revisión y edición, J.G.R.Q., F.R.A. y L.F.P.I.; visualización, J.G.R.Q., L.F.P.I., F.R.A., J.J.H.S., C.L.A. y N.C.A.; supervisión, J.G.R.Q.; administración del proyecto, J.G.R.Q.; obtención de financiación, J.G.R.Q. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a SENER-CONACYT (proyecto: FSE-SENER-2014-246911), a ejidos y empresas forestales por la donación del material lignocelulósico, así como a Axel Correa Ranguel por el apoyo en la preparación de los materiales densificados.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener algún tipo de conflicto de interés.

Nomenclatura

N	Newton
MJ	Megajoules
GJ	Gigajoules
kN	kilonewton
D	Diámetro
L	Longitud
P	Peso
DP	Densidad de partícula
DG	Densidad a granel
IRI	Índice de resistencia al impacto
RC	Resistencia a la compresión
CE	Contenido de ceniza

MV	Material volátil
CF	Carbono fijo
PC	Poder calorífico
DE	Densidad energética

5. Referencias

- Acampora, A., Civitarese, V., Sperandio, G., & Rezaei, N. (2021). Qualitative Characterization of the Pellet Obtained from Hazelnut and Olive Tree Pruning. *Energies* 14(14): 4083. <https://doi.org/10.3390/en14144083>
- Adebayo, T.S., Awosusi, A.A., Kirikkaleli, D., Akinsola, G.D., & Mwamba, M.N. (2021). Can CO₂ emissions and energy consumption determine the economic performance of South Korea? A time series analysis. *Environ Sci Pollut Res* 28: 38969–38984. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13498-1>
- Aguilar-Sánchez, P., Carrillo-Ávila, N., Carrillo-Parra, A., Pérez-Martínez, A., & Núñez- Retana, V.D. (2022). Evaluación de los parámetros de producción de pellets de *Pinus patula* para una estandarización de calidad en México. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad* 1(1): 158–164. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.166>
- Amador-Hernández, J.C. (2015). Ley de Transición Energética. Dirección General de Difusión y Publicaciones, México. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/2315>
- ASABE Standards. (2006). S269.4: Cubes, pellets and crumbles definitions and methods for determining density, durability and moisture content. St. Joseph: *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- ASTM D143. (2007). Standard methods of testing small specimens of timber. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM D2166–85. (2008). Standard test method of compressive strength of wood. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM D440–68. (2007). Standard test method of drop shatter test for coal. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM E872–82. (2013). Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- Bala-Litwiniak, A., & Radomiak, H. (2019). Possibility of the Utilization of Waste Glycerol as an Addition to Wood Pellets. *Waste and Biomass Valorization* 10: 2193–2199. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0260-7>
- Bandara, J.C., Jaiswal, R., Nielsen, H.K., Moldestad, B.M.E., & Eikeland, M.S. (2021) Air gasification of wood chips, wood pellets and grass pellets in a bubbling fluidized bed reactor. *Energy* 233: 121149. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121149>
- Baasch, S. (2021). Energy transition with biomass residues and waste: Regional-scale potential and conflicts. A case study from North Hesse, Germany. *J. Environ. Policy Plan.* 23(2): 243–255. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1888701>

- Carrillo-Parra, A., Ngangyo-Heya, M., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch, R., Rutiaga-Quñones, J.G., & Correa-Méndez, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *PeerJ* 6: e5504. <https://doi.org/10.7717/peerj.5504>
- Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J.G., Ríos-Saucedo, J.C., Ruiz-García, V.M., Ngangyo-Heya, M., Nava-Berúmen, C.A., & Núñez-Retana, V.D. (2021). Quality of Pellet Made from Agricultural and Forestry Waste in Mexico. *BioEnergy Research* 15, 977–986. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10327-8>
- Chávez-Rosales, J.S., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Lujan-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). Basic chemical composition of *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources* 16(1): 816-824. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.816-824>
- Chen, W.H., Peng, J., & Bi, X.T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 847-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- DIN 51731. (1996). Testing of solid fuels – Compressed untreated wood, requirements and testing. Deutsches Institut für Normung. Berlin.
- EN 18134–3. (2015). Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- EN ISO 17828. (2015). Biocombustibles Sólidos. Determinación de la Densidad a Granel. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- Forero-Núñez, C.A., Jochum, J., & Sierra, F.E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación* 35(1): 17–23. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>
- García, C.A., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2016). Introducción. In: García-Bustamante, C.A., Masera, O. (Eds.) Estado del Arte de la Bioenergía en México. *Red Temática de Bioenergía (RTB) del CONACYT* (pp. 9–14). Imagia Comunicación: Guadalajara, Mexico.
- García, D.P., Caraschi, J.C., Ventorim, G., Viera, F.H.A., & Protásio, T.P. (2018). Comparative Energy Properties of Torrefied Pellets in Relation to Pine and Elephant Grass Pellets. *BioResources* 13(2): 2898-2906. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.13.2.2898-2906>
- Gutiérrez-Acosta, J.M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J.J., Ruiz-Aquino, F., Navarrete-García, M.A., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). On the Basic Chemical Composition of Selected Biomass Types from Four Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources* 16(3): 5694-5705. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.3.5694-5705>
- Hansen, M.T., Jain, A.R., Hayes, S., & Bateman, P. (2009). English handbook for wood pellet combustion. EUBIA - European Biomass Industry Association.
- Hiloidhari, M., Baruah, D.C., Kumaria, M., Kumari, S., & Thakur, I.S. (2019). Prospect and potential of biomass power to mitigate climate change: A case study in India. *Journal of Cleaner Production* 220: 931-944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.194>

- Ilari, A., Foppa Pedretti, E., De Francesco, C., & Duca, D. (2021). Pellet Production from Residual Biomass of Greenery Maintenance in a Small-Scale Company to Improve Sustainability. *Resources* 10(12): 122. <https://doi.org/10.3390/resources10120122>
- ISO 17225–2. (2021). Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets.
- Kocer, A., & Kurklu, A. (2020). Production of pellets from pruning residues and determination of pelleting physical properties. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Ef* 44(4): 10346-10358. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1752857>
- Manual ENplus. (2015). Esquema de certificación de calidad para pellets de madera. Parte 3: Requisitos de calidad de los pellets. European Pellet Council (EPC). Bruselas, Bélgica. <https://goo.su/7uSfn>
- Michelena, M.C., & Martín, F.M. (2008). *Los Biocombustibles*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V.M., López-Sosa, L.B., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2020). Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp. for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Appl. Sci.*10(8): 2933. <https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Morales-Máximo, M., Rutiaga-Quñones, J.G., Masera, O., & Ruiz-García, V.M. (2022). Briquettes from *Pinus* spp. Residues: Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies* 15(9): 3419. <https://doi.org/10.3390/en15093419>
- Moran, P., Goggins, J., & Hajdukiewicz, M. (2017). Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate. *Energy and Buildings* 139: 590–607. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.029>
- Mostafa, M., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105: 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>
- Núñez-Retana, V.D., Escobedo-Bretado, M.Á., Quiñones-Reveles, M, Ruíz-Aquino, F., & Carrillo-Parra, A. (2019). Efecto del contenido de humedad sobre pélets de aserrín de madera de *Pinus* spp. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 6(2): 136-144. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/121>
- Nwabueze, Q.A., & Leggett, S. (2024). Advancements in the Application of CO₂ Capture and Utilization Technologies—A Comprehensive Review. *Fuels* 5(3): 508-532. <https://doi.org/10.3390/fuels5030028>
- Onochie, U.P., Obanor, A.I., Aliu, S.A., & Igbodaro, O.O. (2017). Proximate and ultimate analysis of fuel pellets from oil palm residues. *Niger J Technol* 36(3): 987–990. <https://doi.org/10.4314/njt.v36i3.44>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., & Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146: 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>

- Peng, J., Wang, J., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S., Peng, H., & Jia, D. (2015). Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Process. Technol.* 129: 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.010>
- Park, S., Kim, S.J., Oh, K.Ch., Cho, L., Kim, M.J., Jeong, I.S., Lee, Ch.G., & Kim, D. (2019). Investigation of agro-byproduct pellet properties and improvement in pellet quality through mixing, *Energy* 190: 116380. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116380>
- Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N. A. B. D., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., & Haruna, K. (2019). Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. *IEEE Access* 7: 63837–63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>
- Pinilla, J.C., Luengo K., Lobo, F., Navarrete, M., & Navarrete, F. (2022). Comparación de la normativa nacional y europea para la producción de pellet de madera. *Ciencia & Investigación Forestal* 28(1): 73-79. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.561>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J.J., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2022). Evaluation of selected physical and thermal properties of briquette hardwood biomass biofuel. *BioEnergy Research* 15: 1407-1414. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico. *BioResources* 16(2): 2249-2263. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.2.2249-2263>
- Rennkamp, B., Haunss, S., Wongska, K., Ortega, A., & Casamadrid, E. (2017). Competing coalitions: The politics of renewable energy and fossil fuels in Mexico, South Africa and Thailand. *Energy Research & Social Science* 34: 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.07.012>
- Rutiaga-Quñones, J.G., Pintor-Ibarra, L.F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M.A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J.R., Hernández-Solís, J.J., & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources* 15(4): 8529-8553. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Santiago-García, W., Fuente-Carrasco, M.E., Sotomayor-Castellanos, J. R., & Carrillo-Parra, A. (2019). Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico. *Wood Res.* 64(1): 71-82. <https://goo.su/4c5wbn>
- Sette, C.R.Jr., Santiago-Hansted, A.L., Novaes, E., Fonseca-e-Lima, P.A., Rodrigues-de-Souza-Santos, A., & Minoru-Yamaji, F. (2018). Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Ind Crops Prod* 122: 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>
- Sgarbossa, A., Costa, C., Menesatti, P., Antonucci, F., Pallotino, F., Zanetti, M., Grigolato, S., & Cavalli, R. (2015). A multivariate SIMCA index as discriminant in wood pellet quality assessment. *Renewable Energy* 76: 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.041>
- Sher, F., Pans, M.A., Afilaka, D.T., Sun, Ch., & Liu, H. (2017). Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidised bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. *Energy* 141: 2069-2080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.118>

- Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., & Olba-Zięty, E. (2022). Cascaded use of perennial industrial crop biomass: The effect of biomass type and pre-treatment method on pellet properties. *Industrial Crops and Products* 185: 115104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115104>
- Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A.S., & Ofozor, C. A. (2020). Does wood biomass energy use reduce CO₂ emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members. *Journal of Cleaner Production* 253: 119996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119996>
- Thek, G., & Obernberger, I. (2012). The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets. Abingdon: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- EN 14961–2. (2012). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. <https://goo.su/Kd0Tp>
- UNE EN 14961–6. (2012). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 6: Pélets no leñosos para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. <https://goo.su/rD1Ub>
- UNE-EN 14918. (2011). Determinación del poder calorífico. Norma Europea, CEN Comité Europeo para Estandarización. Madrid, España. <https://goo.su/Juu2>
- UNE-EN ISO 18122. (2023). Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de ceniza. Estándar Europeo, CEN Comité Europeo para Estandarización. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0071397>
- Velázquez-Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. *Editorial Reverté*.
- Wang, C., Chang, Y., Zhang, L., Pang, M., & Hao, Y. (2017). A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China. *Energy* 120: 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.085>
- Yuping, L., Ramzan, M., Xincheng, L., Murshed, M., Awosusi, A.A., BAH, S.I., & Adebayo, T.S. (2021). Determinants of carbon emissions in Argentina: The roles of renewable energy consumption and globalization. *Energy Reports* 7: 4747-4760. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.065>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Dynamic Simulation of a Non-linear CSTR Using Scilab/Xcos®: a Practical Approach for Chemical Engineering Education

Simulación dinámica de un CSTR No Lineal usando Scilab/Xcos®: un enfoque práctico para la enseñanza de la Ingeniería Química

Luis Carlos Juárez-Martínez^{1*}, Javier Tovar-Facio¹, Rocío Anchondo-Granados¹, Rosalía Ruiz-Santos¹, Anel Rocío Carrasco-Hernández¹

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. Circuito Universitario S/N, Campus UACH II, Chihuahua, Chih. 31125, México.

*Correspondencia: Correo electrónico: ljuarezm@uach.mx (Luis Carlos Juárez-Martínez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1874>

Recibido: 13 de marzo de 2025; Aceptado: 30 de abril de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Sergio Valle-Cervantes

Abstract

Understanding the dynamic behavior of chemical processes is essential for controlling industrial operation, enhancing safety, and products quality. This work provides an accessible and practical guide for students and educators to demonstrate the potential of Scilab/Xcos® as an open-source alternative to MATLAB/Simulink®, for dynamic process simulation in chemical engineering education. The study focuses on a non-linear Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) model, with a classic example used to illustrate the different phenomena involved in reaction engineering. Two different scenarios were simulated to analyze the transient behavior of the CSTR under different coolant temperature perturbations. In the first case, a 10 K reduction in coolant temperature led to a significant drop in reaction temperature and increase in reactant concentration. In the second case, an increase of 5 K in coolant temperature resulted in oscillatory behavior, showcasing the reactor's sensitivity to temperature changes. The presented simulation is consistent with reference values from the literature, confirming the accuracy and reliability of the Xcos® model.

Key words: dynamics systems, open-source, MATLAB/simulink alternatives.

Resumen

Comprender el comportamiento dinámico de los procesos químicos es esencial para el control de procesos industriales, la mejora de la seguridad y la obtención de productos de calidad. Este trabajo proporciona una guía accesible y práctica para estudiantes y educadores, demostrando el potencial de Scilab/Xcos® como alternativa de código abierto a MATLAB/Simulink®, para la simulación dinámica de procesos en la enseñanza de la ingeniería química. El trabajo se centra en el análisis de un Reactor Continuo de Tanque Agitado (CSTR), utilizando un ejemplo clásico de la literatura para ilustrar los distintos fenómenos involucrados en la ingeniería de reacciones cuando existen no linealidades. Se simularon dos escenarios diferentes para analizar el comportamiento transitorio del CSTR bajo distintas perturbaciones en la temperatura del refrigerante. En el primer caso, una reducción de 10 K en la temperatura del refrigerante provocó una disminución significativa en la temperatura de reacción y un aumento en la concentración del reactivo. En el segundo caso, un incremento de 5 K en la temperatura del refrigerante resultó en un comportamiento oscilatorio, evidenciando la sensibilidad del reactor a los cambios de temperatura. La simulación presentada es consistente con los valores de referencia de la literatura, lo que confirma la precisión y confiabilidad del modelo en Xcos® propuesto.

Palabras clave: sistemas dinámicos, código abierto, alternativas a MATLAB/simulink®.

1. Introduction

The design and operation of industrial plants to produce chemicals requires a solid understanding of the dynamics systems. This field explores intricate mechanisms governing chemical reactions with time varying behaviors, facilitating the anticipation, and regulation of crucial variables like reaction rate, reaction conversion, and product selectivity. By understanding the kinetics and thermodynamics involved, engineers can design efficient processes, decrease production expenses, and mitigate environmental footprints. Moreover, process dynamics research plays a crucial role in maintaining safety standards and products quality in the chemical industry, while accelerating improvements in chemical processes (Shokry *et al.*, 2020), automation technologies (Shi *et al.*, 2021), and process intensification (Baldea & Edgar, 2018).

In this respect, Simulink® a toolbox from MATLAB® has helped chemical engineering students at many universities to learn dynamics and process control. Simulink® is a programming environment characterized by its block-oriented architecture, making it well-suited for dynamic system modeling and simulation. Its functionality extends to facilitating system-level design, automatic code generation, and testing and verification embedded systems. A notable attribute of Simulink® is its graphical editor and solvers, which enhance the intuitiveness and simplicity of modeling and simulation tasks compared to conventional numerical coding methods (The MathWorks, 2025).

MATLAB/Simulink® has been used widely for chemical process control analysis. It is easy to find research papers, tutorials and courses focused on the use of Simulink® for different process control applications, such as: temperature control of heat exchangers (Jin *et al.*, 2021), control of chemical reactors (Muhammad *et al.*, 2019) and distillation columns control (Minh, 2010). In addition, some tutorials can be found at the MathWorks website (The MathWorks, 2025) and full material of Dynamics and Control courses are available online (for example, Process Dynamics and Control by

J. Hedenren (Hedengren, 2024) or Process Dynamics, Operations and Control by B. Johnston (MIT OpenCourseWare, 2024)).

Despite the good features offered by MATLAB/Simulink®, the main disadvantage is related to licensing cost, which could limit the access to this tool in low and lower middle-income countries. Consequently, open-source alternatives represent an attractive option for dynamic system modeling and simulation. Students and educators can find dynamics and control tools that can be used in the Python programming language; however, these require a level of experience in using this language or computational tools that students do not always have. Xcos® is a dynamic systems modeler and simulator that can make up for the lack of programming experience. This powerful tool is available with Scilab®.

Scilab® offers the benefit of being an open-source simulation tool with a user-friendly interface. It encompasses numerous mathematical functions and allows the integration of programs from other languages, such as C++ and Fortran. Additionally, it features a control-oriented toolbox known as Xcos®, which employs a block-oriented programming approach. Xcos® enables the creation of mathematical models graphically, utilizing fundamental computing blocks in discrete and continuous time domains (Dassault Systèmes, 2024).

The Autonomous University of Chihuahua (Universidad Autónoma de Chihuahua, UACH) in Mexico, offers a process dynamics and control course at the ninth semester (the last semester) in the undergraduate Chemical Engineering and Food Engineering programs. This subject is a chemical engineering course commonly offered in other universities worldwide at the end of the program, as mentioned by Moodley (Moodley, 2020).

Although, the exploration of chemical reactor dynamics starts with the chemical reactor design course during the third year of the chemical engineering program at the UACH, the process dynamics and control course is focused on understanding the dynamic performance and control strategies of different process units such as: mixing tanks, separation columns, heat exchangers, boilers, and chemical reactors. An important part of the course is that the students gain knowledge about transient behavior of the processes to evaluate different scenarios that can be found in industry related to normal and abnormal operation conditions. To achieve this, the use of computational tools for modeling and simulating chemical processes in dynamic states is both crucial and necessary in the classroom. The same assertion has been made by other authors such as, Moodley (2020), Vieira *et.al.* (2019), and Henrique *et.al.* (2018).

According to Vieira *et.al.* (2019), Xcos® is an excellent option for studying dynamic simulations. However, there is a lack of research papers focused on training and demonstrating the utility of Xcos® for academic purposes, with most information concentrating on process control.

Hence, the aim of this paper is to present a useful guide for students and professors interested in the field of chemical process dynamics by using the Scilab/Xcos® programming environment. Also, the paper brings a comprehensive derivation of the dynamic mass and energy balance equations involved in the system, by solving a classical non-linear Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) dynamics example, described in the workhorse book of Process Dynamics and Control written by Seaborg, *et.al.* (2016).

To facilitate reading, the paper is divided into the following sections: in Section 2 an example of dynamic assessment process is presented, and mathematical model and implementation in Xcos® is also presented. In section 3, the simulations results can be found. Finally, the conclusions are given in section 4.

2. Materials and Methods

The study of continuous stirred-tank reactors in chemical engineering programs is of a great importance because they are widely used in different industrial applications, such as: pharmaceuticals (Hu, 2021), polymers manufacturing (Wang *et al.*, 2018), in biotechnology to treat petroleum wastewater (Pugazhendi *et al.*, 2017), and some novel applications such as clean hydrogen production (Ghimire *et al.*, 2015).

Another important characteristic is that CSTR models are simpler than other reactors such as tubular and packed-bed reactors. Hence, the study of continuous stirred-tank reactors offers a practical means to demonstrate modeling principles for chemical reactors in an educational setting.

2.1. Model description

For this study, a non-isothermal continuous stirred-tank reactor was modeled and simulated, adapted from (Seborg *et al.*, 2016). In this setup, a liquid-phase chemical reaction is studied, where species A irreversibly transforms into species B. The reaction equation can be represented as follows:



An assumption is that the reaction rate is determined by the concentration of component A, following first-order reaction kinetics (Eq. 2).

$$r = kC_A \quad \text{Eq. (2)}$$

Where (r) is the reaction rate, (k) is the reaction rate constant, and (C_A) is the molar concentration of the reactant A.

For single-phase reactions, it can be assumed that the rate constant depends only on the reaction temperature that it can be described by the Arrhenius equation, expressed by Eq. (3).

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Eq. (3)}$$

Where (A) is the frequency factor, (E_a) is the activation energy, (R) is the ideal gas constant, and (T) is the absolute reaction temperature.

Regarding Eqs. (2) and (3), these are classified as semi-empirical relations since the parameters (A) and (E_a) are obtained by fitting experimental data.

In Fig. 1, the schematic diagram of the CSTR studied in this work is shown. As can be seen, only component A is fed to the reactor at a certain flow rate (q), at temperature (T_f) with a molar

concentration (C_{Af}). The outlet stream exits the reactor at a flow rate of (q), at the reaction temperature (T) with a concentration of (C_A). To keep reaction at the desired temperature (nominal value), a cooling fluid is fed through the cooling coil at temperature (T_c).

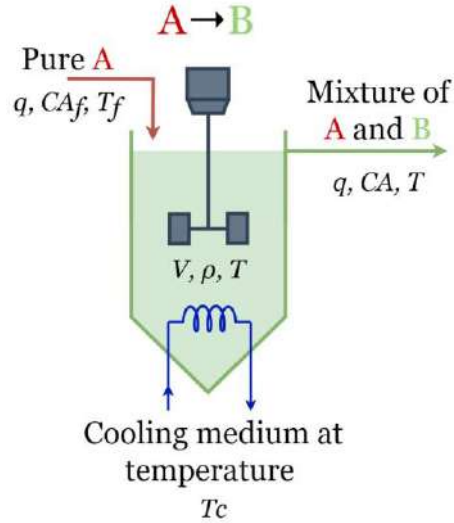


Figure 1. Continuous Stirred Tank Reactor adapted from Seaborg *et.al.* (2016).
Figura 1. Reactor Continuo de Tanque Agitado adaptado de Seaborg *et al.* (2016).

2.2 Mathematical model

This section provides the dynamic derivation of the mass and energy balance equations based on fundamental principles.

Mass balance

The derivation of the ordinary differential equation that describes the accumulation rate of the chemical reactants is based on several ideal assumptions (Seborg *et al.*, 2016):

- A complete mixing is considered.
- Feed and products have constant densities, denoted as (ρ).
- Reaction takes place at constant volume (V).

Under the previous assumptions, the general mass balance equation can be expressed in the form shown by Eq. (4).

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{G}_i \quad \text{Eq. (4)}$$

The derivative term $\left(\frac{dM}{dt}\right)$ in Eq. (4) represents the material accumulation in the system, ($\dot{m}_{in}$) and ($\dot{m}_{out}$) are the inlet and outlet mass flow rates, respectively, ($\dot{G}_i$) is the generation rate of any chemical

species due to chemical reactions. Since (V) and (ρ) are constants, then the mass (M) and mass flow rate ($\dot{m}$) can be expressed in the form of Eqs. (5) and (6), respectively.

$$M = \rho \cdot V \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot q \quad \text{Eq. (6)}$$

On the other hand, the rate of generation and consumption of the reactant (A, in this reaction) is based on reaction kinetics; see Eq. (2). Assuming a well-mixed reactor condition, the reaction rate (r_i) does not change with respect to the reactor position. Then, the generation rate of any species can be expressed in the form of Eq. (7).

$$\dot{G}_i = r_i V \quad \text{Eq. (7)}$$

For this example, a first-order reaction is considered with respect to A; hence, the kinetic equation is given by Eq. (8)

$$r_A = kC_A \quad \text{Eq. (8)}$$

Substituting Eqs. (5–8) into Eq. (4) leads to Eq. (9):

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho q_i - \rho q - V k C_A \quad \text{Eq. (9)}$$

Where (q_i) and (q) are the inlet and outlet volumetric flows, respectively.

Finally, since (V) and (ρ) are constants, the inlet and outlet volumetric flow rates (q_i and q) are equal, and this assumption must be satisfied at all the time (Seborg *et al.*, 2016).

With the previous assumptions, the unsteady-state component balance for specie A (in molar units) is described by Eq. (10).

$$V \frac{dC_A}{dt} = q(C_{A_i} - C_A) - V k C_A \quad \text{Eq. (10)}$$

Energy balance

To derive the energy balance equation, the following assumptions are needed (Seborg *et al.*, 2016):

- The thermal capacitance of the coolant and the wall of the heat transfer tubes is negligible compared to the thermal capacitance of reaction species inside the reaction tank.
- Uniform coolant temperature distribution is considered, and it is denoted as (T_c). Therefore, any temperature changes in coolant temperature when passes through the tubes is neglected.
- The heat of mixing is negligible compared to the reaction enthalpy.
- Thermal losses to the ambient and shaft work are neglected.

According to the assumptions, the dynamic general energy balance equation is presented in Eq. (11).

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g - \dot{E}_c \quad \text{Eq. (11)}$$

Where derivative term $\left(\frac{dE}{dt}\right)$ represents the energy accumulation in the system, $(\dot{E}_{in})$ and $(\dot{E}_{out})$ are the energy flow that enters and exits the system, and $(\dot{E}_g)$ and $(\dot{E}_c)$ is the rate of reaction heat.

To account the energy accumulation in the system, and the energy flow through the system, Eqs. (12-14) are used in terms of density, volume and enthalpy.

$$E = M \cdot h = \rho \cdot V \cdot h \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}_{in} \cdot h_{in} = \rho \cdot q_i \cdot h_{in} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$\dot{E}_{out} = \dot{m}_{out} \cdot h_{out} = \rho \cdot q \cdot h_{out} \quad \text{Eq. (14)}$$

Where (M) is the reaction mass, $(\dot{m}_{in})$ and $(\dot{m}_{out})$ are the inlet and outlet mass flow rates, and (h) , (h_{in}) and (h_{out}) are the inlet and outlet specific enthalpies.

The rate of heat generation $(\dot{Q}_{gen})$ due to the chemical reaction is accounted by Eq. (15), and the heat transfer between the reaction and the coolant is expressed by Eq. (16).

$$\dot{Q}_{gen} = (-\Delta H_r) V k C_A \quad \text{Eq. (15)}$$

$$Q = UA(T_c - T) \quad \text{Eq. (16)}$$

Where $(-\Delta H_r)$ is the change of enthalpy of reactants and products, $(V k C_A)$ is the reaction rate at constant volume, (U) represents the overall heat transfer coefficient, (A) denotes the heat transfer area, (T_c) and (T) are the average coolant and reaction temperatures, respectively.

Substituting Eqs. (12-16) in Eq. (11), the energy balance equation takes the form of Eq. (17), where specific enthalpies can be written as the product of $(C_p \cdot T)$.

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = \rho q C_p (T_f - T) + (-\Delta H_r) V k C_A + UA(T_c - T) \quad \text{Eq. (17)}$$

2.3 Model implementation in Xcos®

The intuitive graphical editor in Xcos® simplifies the representation of mathematical models through block diagrams, where each block corresponds to a predefined function or a user-defined custom function. These blocks connect seamlessly within the interface, enabling straightforward system design and analysis (Dassault Systèmes, 2024). In this section a brief description of the blocks used on the CSTR model is presented.

Xcos® Blocks description

To guide readers in creating the block diagram shown in Fig. 2, Table 1 provides a description of each object used in this work. The block descriptions are available in the *palette browser* within Xcos®.

CSTR model

The CSTR model, which includes Eqs. (3, 10, and 17), corresponds to a coupled set of differential and algebraic equations. Each equation was implemented in separate subsystems (*SUPER_fblocks*) to improve the understanding of the coupled system and facilitate the manipulation of the variables involved, as shown in Fig. 2.

The illustration of Fig. 2 shows the interaction between subsystems. The initial guess is based on the steady-state conditions for reaction temperature (T_0) and specie A concentration (C_{A_0}). Under these conditions, the reaction rate constant (k) is computed within the *Arrhenius Equation Subsystem* and then passed to the *Mass and Energy Balance Subsystems* to update the reaction temperature and concentration. This process repeats multiple times until the simulation is complete. The system integrates user-defined functions with built-in Xcos blocks for mass and energy balances. The mass balance equation is solved through a dedicated subsystem (highlighted in magenta), while the energy balance is handled in a separate module (in red). The data flow arrows represent the directional exchange of variables (e.g., concentration, temperature) between the subsystems and the main function block.

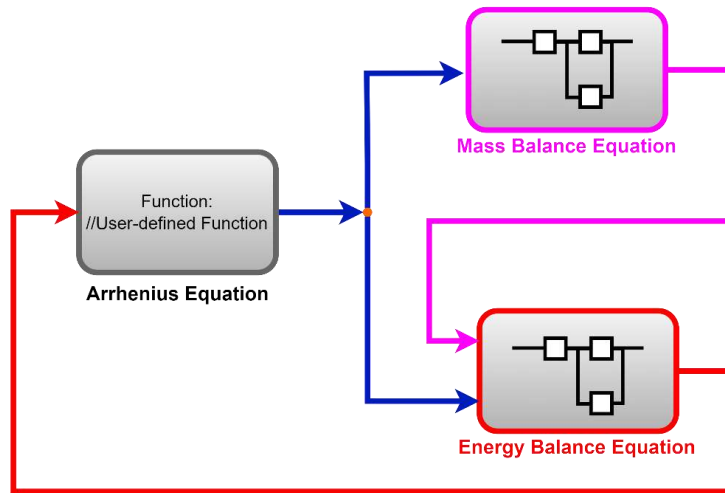
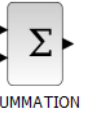
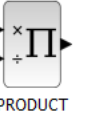


Figure 2. Diagram of the coupled system implemented in Xcos® for the dynamic simulation of a Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR).

Figura 2. Diagrama del sistema acoplado implementado en Xcos® para la simulación dinámica de un reactor continuo de tanque agitado (CSTR).

Table 1. Description of the blocks used from *palette browser* in Xcos®.
Tabla 1. Descripción de los bloques utilizados del *palette browser* en Xcos®.

Block name	Description
	This block is an integrator. The output y is the integral of the input u at the current time step t .
	Set constant value block. This block allows setting a numeric constant value.
	This block performs addition or subtraction on scalar, vector or matrix inputs. The input datatype is set with the datatype parameter. The <i>number of inputs or sign vector</i> parameter defines the number of inputs and operation. For a single vector's input, the block collapses the elements of the vector. Vectors/matrices inputs must have the same size.
	This block computes element-wise multiplication or division of its vector inputs. The number of inputs and operation are specified with the number of inputs or sign vector parameter. To <i>multiply/divide</i> the input u_i , set in this parameter a vector k with +1 (<i>multiply</i>) or -1 (<i>divide</i>) for the input u_i .
	The unique output of this block generates a regular train of events that are scheduled by parameter <i>period</i> in seconds. The starting date of events generation can be set in seconds with the <i>Initialization Time</i> parameter.
	The Scope block displays its input with respect to simulation time. Both axes have a common range. The Scope allows you to adjust the amount of time and the range of input values displayed. It has the feature to scale the graph at runtime.
	This block opens a new Xcos® window for editing a new block diagram. This diagram describes the internal functions of the super block. Super block inputs and outputs (regular or event) are designated by special (input or output) blocks.
	This block can realize any type of Scicos block. The function of the block is defined interactively using dialogue boxes and in Scilab® language. During simulation, these instructions are

interpreted by Scilab®; the simulation of diagrams that include these types of blocks is slower

Simulation parameters

The effect of sudden changes in coolant temperature (T_c), was analyzed by replicating both positive and negative step changes in (T_c), as reported in Seborg *et al.* (2016).

Table 2 presents key parameters and nominal operating conditions for the Continuous Stirred Tank Reactor. The system is described by ordinary differential equations (ODEs), with two state variables: reactant concentration (C_A) and reactor temperature (T). The cooling water temperature (T_c) serves as the manipulated variable.

Table 2. Simulation parameters (Seborg *et al.*, 2016).
Tabla 2. Parámetros de simulación (Seborg *et al.*, 2016).

Parameter	Symbol	Value	Units
Activation energy	E_a	72,750	J/mol
Arrhenius pre-exponential	k_0	7.2×10^{10}	min^{-1}
Gas constant	R	8.314	$J/mol \cdot K$
Reactor volume	V	100	L
Density	ρ	1000	g/L
Heat capacity	C_p	0.239	$J/g \cdot K$
Enthalpy of reaction	ΔH_r	-50,000	J/mol
Heat transfer coefficient	UA	50,000	$J/min \cdot K$
Feed flowrate	q	100	L/min
Feed concentration	C_{A_f}	1.0	mol/L
Feed temperature	T_f	350	K
Initial concentration	C_{A_0}	0.5	mol/L
Initial temperature	T_0	350	K
Coolant temperature	T_c	300	K

Mass balance equation subsystem configuration

To implement the mass balance equation in Xcos® environment, Eq. (10) needs to be rearranged as follows: the volume divides the equation to have only the derivative term at the left-hand side of the equation. As a result, both terms on the right-hand side of Eq. (10) are also divided by the volume (V), yielding a new equation, given in Eq. (18).

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{q}{V} (C_{A_i} - C_A) - k C_A \quad \text{Eq. (18)}$$

The block diagram for Eq. (18) that is within the subsystem called *Mass Balance Equation*, is presented in Fig. 3. The nominal parameters (q), (V), and (C_{A_f}) are modeled using constant blocks since their values remain unchanged during the simulation. To declare their respective value, the *set context* box that can be found on the simulation tab was used. About algebraic operations, they are represented by their respective addition, subtraction, multiplication and division blocks. To help readers understand how these operations were performed, labels were added to the corresponding blocks to indicate the type of computation carried out, see Fig. 3.

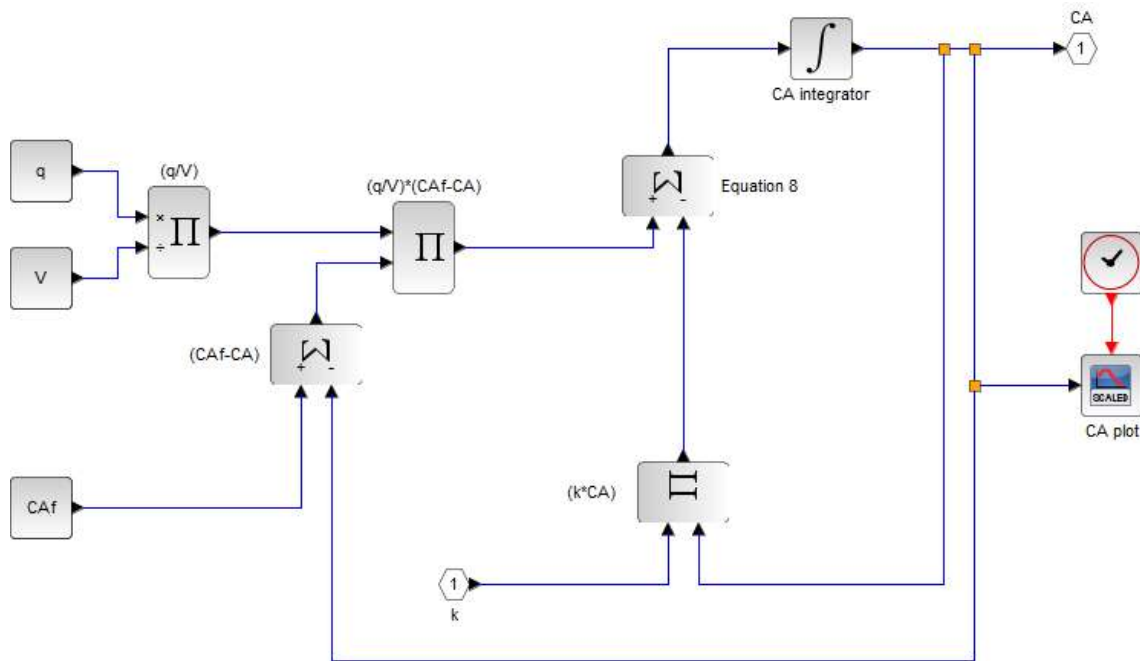


Figure 3. Block diagram in Xcos® representing the dynamic implementation of the mass balance equation for the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR).

Figura3. Diagrama de bloques en Xcos® que representa la implementación dinámica de la ecuación de balance de masa para el Reactor de Tanque Agitado Continuo (CSTR).

In Fig. 3 is shown the problem model. The model incorporates key input parameters such as flow rate (q), reactor volume (V), and feed concentration (C_A). The expression $(q/V)(C_{Af} - C_A)$ represents the convective mass transport, and the term (kC_A) accounts for the first-order reaction kinetics. The output concentration (C_A) is obtained through numerical integration and plotted in real time using the Scope block.

The *set context* box allows variable definition and mathematical operations to simplify variable manipulation, see Fig. 4.

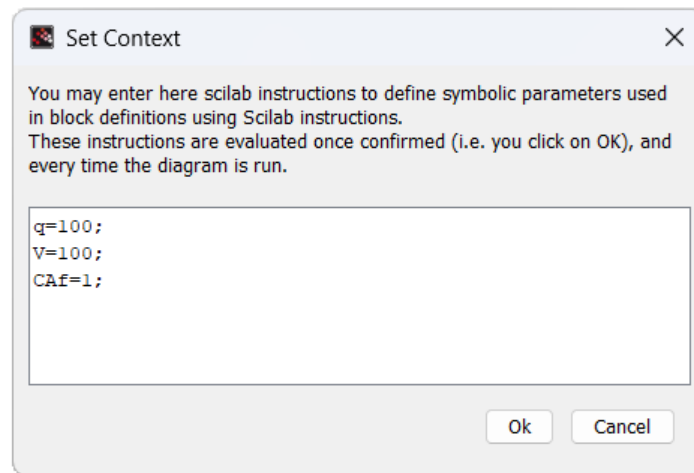


Figure 4. Variable definition in *set context* for the mass balance equation.

Figura 4. Definición de variables en *set context* para la ecuación de balance de masa.

Finally, the integrator is set up with the initial condition $C_{A_0} = 0.5 \text{ mol/L}$. This action can be done by clicking on the integrator block and typing the desired value on the *initial condition* blank space, see Fig. 5.

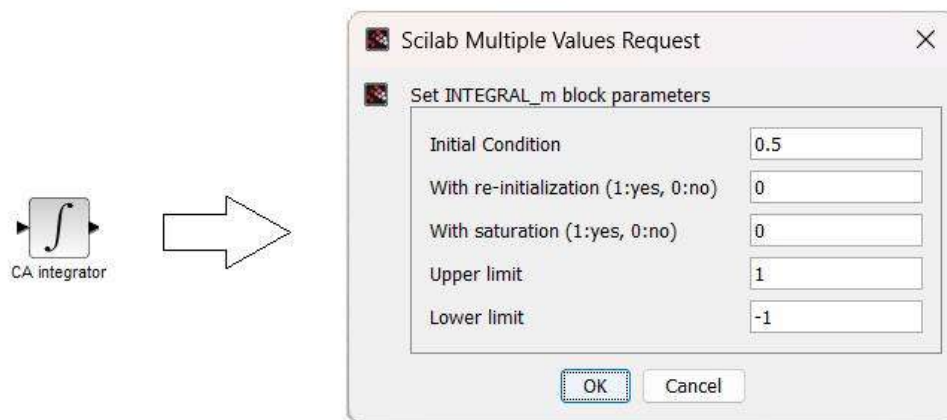


Figure 5. Initial condition set up for the C_A integrator block.

Figura 5. Configuración de la condición inicial para el bloque integrador C_A .

Energy balance equation subsystem

Analogous to the mass balance equation, Eq. (17) must be solved to isolate the derivative term. To achieve this, Eq. (17) is divided by the product of $(\rho V C_p)$, resulting in a new equation, Eq. (19).

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{V} (T_i - T) + (-\Delta H_r) \frac{k C_A}{\rho C_p} + \frac{UA}{\rho V C_p} (T_c - T) \quad \text{Eq. (19)}$$

In Fig. 6, the block diagram to solve Eq. (19) is presented. In this case the nominal parameters were also introduced as constant blocks, such as: $q, V, T_f, \Delta H_r, \rho, UA$, and C_p .

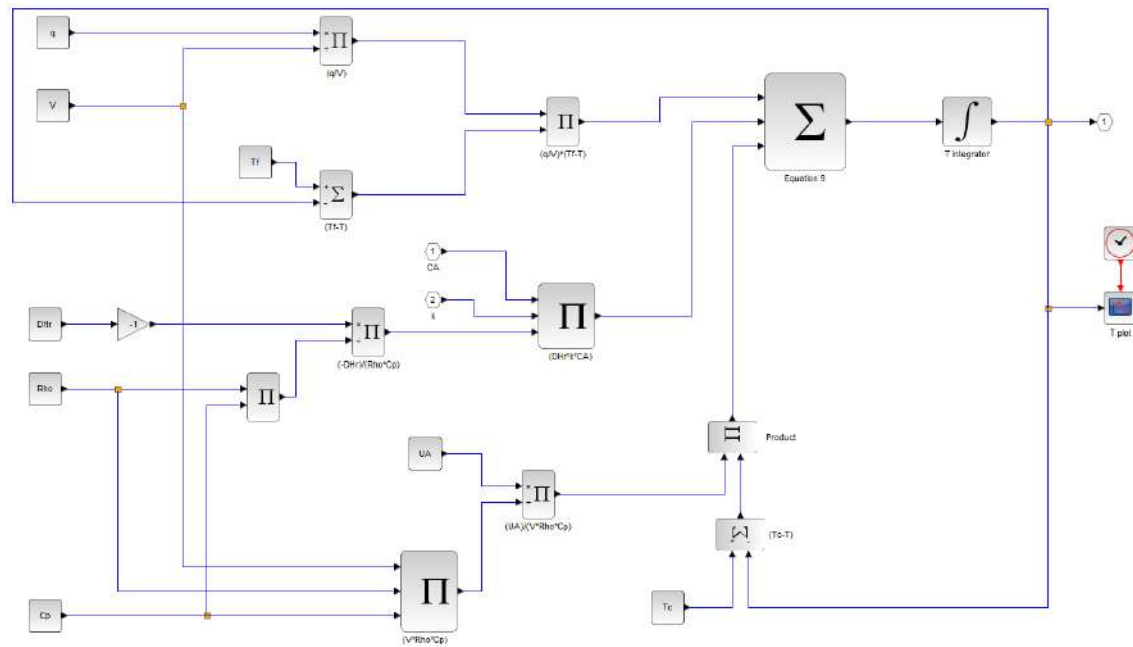


Figure 6. Xcos® block diagram implementing the energy balance equation for the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR).

Figura 6. Diagrama de bloques de Xcos® que implementa la ecuación de balance de energía para un Reactor de Tanque Agitado Continuo (CSTR).

In Fig. 6 is shown how the model dynamically calculates the reactor temperature (T) by integrating contributions from convective heat exchange $(q/V)(T_f - T)$, heat generated by the reaction $(-\Delta H_r k C_A)$ and heat transfer with the cooling medium $(UA/V \rho C_p)$. The values of the nominal constant parameters were also set using the *set context* box (see Fig. 7).

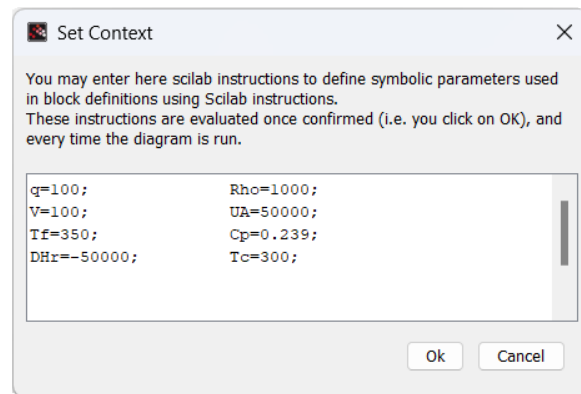


Figure 7. Variable definition in *set context* box for energy balance equation.

Figura 7. Definición de variables en *set context* para la ecuación de balance de energía.

For the reaction temperature integrator, the initial condition was set to 350 K, as shown in Fig. 8.

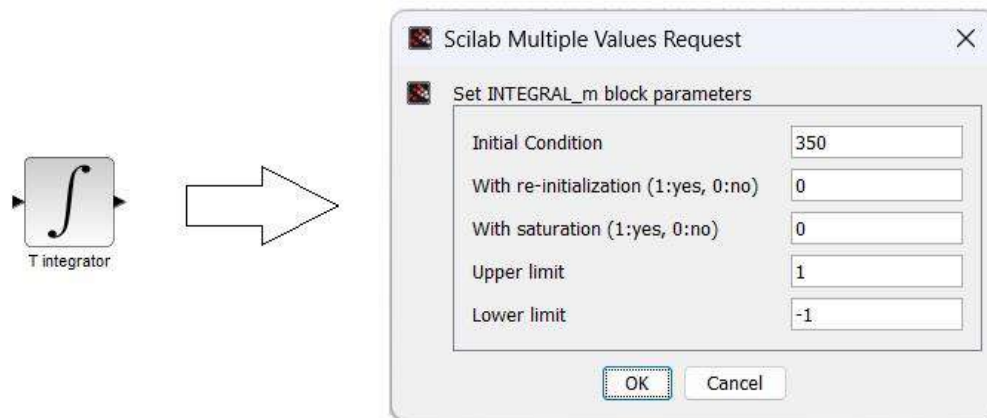


Figure 8. Initial condition set up for reaction temperature integrator block.

Figura 8. Configuración de la condición inicial para el bloque integrador de temperatura de reacción.

Arrhenius equation block

The Arrhenius equation is an exponential function that depends on temperature (Eq. 3). Each time the reaction temperature changes, the reaction rate constant must be recalculated. In Xcos®, solving this equation requires utilizing the user-defined function *sfunc_block_m*.

Double-clicking the *sfunc_block_m* opens a new configuration window. The first two entries, *input port sizes* and *output port sizes*, should be set to [1,1] and [1,1], respectively. This configuration indicates that a single input variable, the reaction temperature (T) from the Energy Balance Subsystem enters the block, while a single output variable, the specific rate constant, exits. Once the input and output port sizes are defined, click *OK* to proceed.

The previous action displays a new box where the function is introduced as follows: on the top of the box the name of the function is written as *Arrhenius Equation*, then the inlet variable (T) that comes from the *Energy Balance* equation is defined as *Global T*. If more input variables are needed, all of them must be settled as global variables.

To solve a time-dependent function in Xcos®, it must be expressed in the form $y = u$. The Arrhenius equation is then solved in the form of Eq. (20).

$$y_1 = (u_2) \cdot \exp\left(\frac{u_3}{u_4 \cdot u_1}\right) \quad \text{Eq. (20)}$$

Where $y_1 = k(T)$;

$u_2 = A$;

$u_3 = E_a$;

$u_4 = R$;

$u_1 = T$

Once the function is defined, click *ok* to continue. The new box, the global variable (T) is rewritten for initialization and click *ok*. If more input variables are needed, they must be declared here for their respective initialization.

The fourth box is used to create additional commands such as: create graphics, export data open/close graphics, etc. In this case the box has been left in blank, due to additional instructions are not necessary. Finally, the last box can be used to define restriction for input, output and state variables if needed, but in this case, it was also left in blank. The whole process of the user-defined function configuration is depicted in Fig. 9.

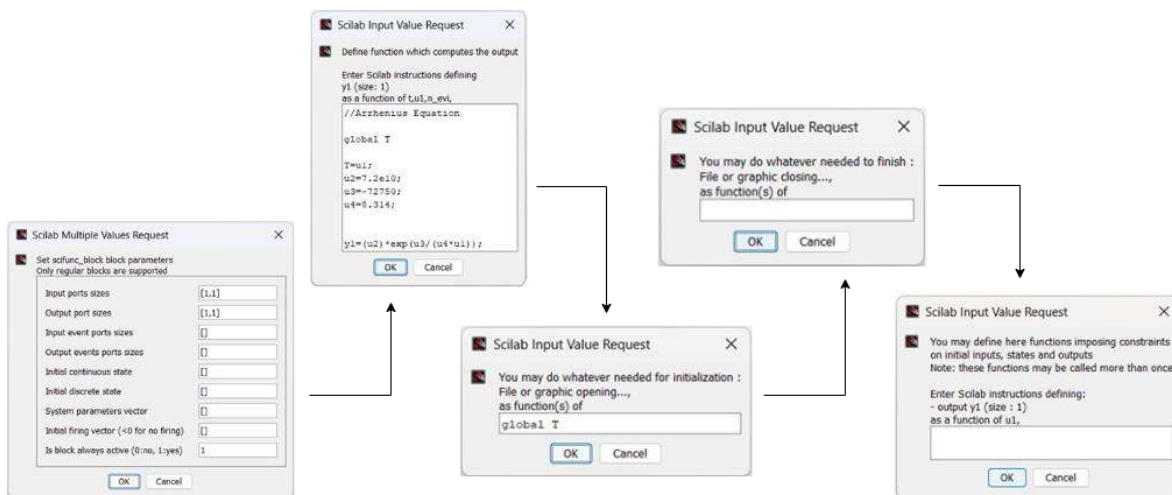


Figure 9. The Arrhenius equation configuration using the *sfunc_block_m*.
Figura 9. Configuración de la ecuación de Arrhenius utilizando el *sfunc_block_m*.

3. Results and discussion

To analyze the transient behavior of the CSTR model presented in the previous section, two different scenarios were simulated as follows: for the first case, enhanced cooling was simulated by modifying T_c from 300 K to 290 K. The second case focuses on reducing the cooling rate, accomplished by increasing T_c from 300 K to 305 K. For both cases, the simulation time was set to 10 minutes.

In the first case, decreasing the coolant temperature to 290 K has two major effects. First, the reaction temperature drops by approximately 37 K, reaching a new steady-state value of 312.6 K. Second, the molar concentration of the reactant (C_A) increases from 0. mol/L to a new steady-state value of 0.952 mol/L.

For the second simulation, when the cooling jacket temperature is set at 305 K, the CSTR exhibits sustained oscillations due to the exothermic nature of the reaction and its strong temperature dependence. As the temperature spikes, the reaction accelerates quickly consuming reactant A. Once the concentration drops, heat generation decreases, allowing the reactor to cool. The continuous feed then restores the amount of A, initiating a new cycle.

This nonlinear feedback between reaction kinetics and heat removal leads to self-sustained oscillations in temperature and concentration. As explained by Seborg *et al.* (2016), such behavior is not unusual in chemical reactors, particularly under marginal or critical operating conditions. Small variations in parameters like the coolant temperature, inlet concentration, or activation energy can drastically shift the system from steady-state to oscillatory or even unstable regimes.

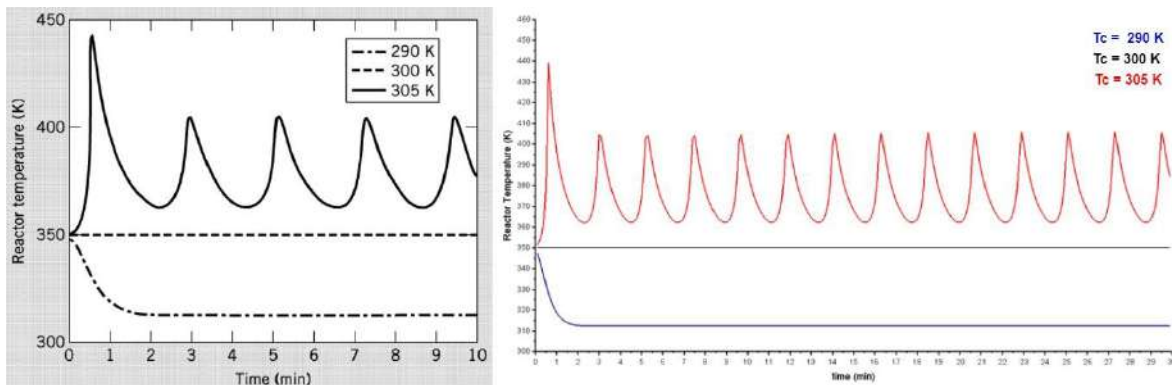


Figure 10. Reactor temperature response due to coolant temperature changes (T_c), nominal temperature of 300 K. Left side represents the reference results from Seborg *et al.* (2016) and the right side shows the results obtained with Xcos®.

Figura 10. Respuesta de la temperatura del reactor debido a cambios en la temperatura del refrigerante (T_c), con una temperatura nominal de 300 K. El lado izquierdo representa los resultados de referencia de Seborg *et al.* (2016), y el lado derecho muestra los resultados obtenidos con Xcos®.

According to this, the results obtained with Xcos® align with the reference values, confirming that the CSTR model simulated in this study accurately represents the reference model reported by

Seborg *et al.* (2016). Figs. 10 and 11 present a graphical comparison between the reference results and the previously discussed simulations.

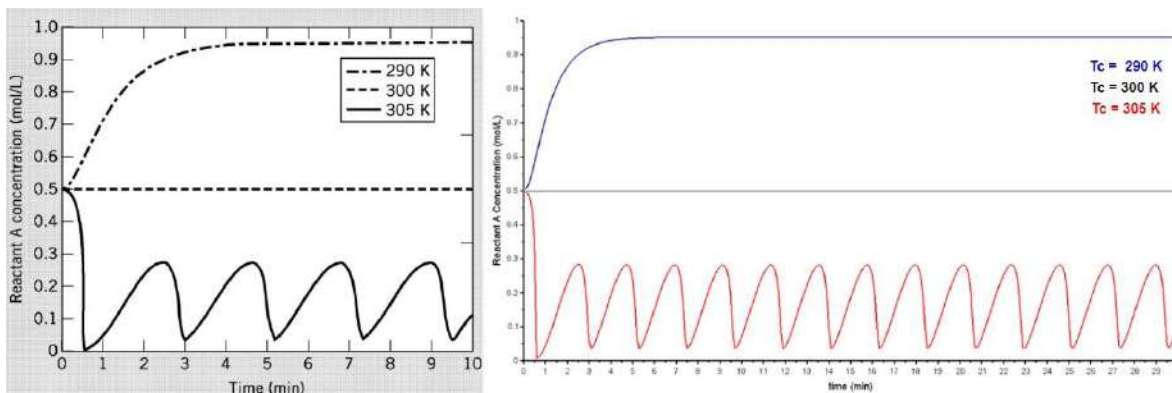


Figure 11. Concentration response due to coolant temperature changes (T_c), nominal temperature 300 K. Left side represents the reference results from Seborg *et al.* (2016) and the right side shows the results obtained with Xcos®.

Figura 11. Respuesta de la concentración debido a cambios en la temperatura del refrigerante (T_c), temperatura nominal de 300 K. El lado izquierdo representa los resultados de referencia Seborg *et al.* (2016), y el lado derecho muestra los resultados obtenidos con Xcos®.

4. Conclusions

This study explored the use of Xcos® for solving dynamic chemical engineering problems. Specifically, the dynamics of a continuous stirred tank reactor (CSTR) were analyzed, including model description, mathematical formulation, and Xcos® implementation.

Although, the use of Scilab/Xcos® is not new in research or academia, most of the research papers are focused on dynamics for control purposes of specific problems in which it is assumed that readers have certain knowledge on the topic to understand both mathematical models and implementation. Hence, the structure of this paper was intended to be a practical guide describing the steps to follow for dynamic modeling and simulation with Xcos®, especially for students and educators interested in dynamic systems.

The simulator was validated using a well-known example from Seborg *et al.* (2016), a widely used textbook in process dynamics and control courses. The simulation results closely matched the reference values, confirming the accuracy of the model. Therefore, this model can serve as a reliable reference for educational projects and research activities related to chemical reaction engineering.

Currently, our research group is developing different unit operation simulators that are commonly studied in chemical engineering programs. The research group aims to offer a wide range of models for analyzing full plant process dynamics and supports the teaching process using open-source tools.

Hence, we encourage readers to contact the corresponding author for access to the simulator or for further guidance on how to implement the models discussed in the paper. The authors are open to providing support for specific simulations, answering technical questions, and offering insights on adapting the simulator to different case studies or research needs. Reaching out can help ensure the correct use of the simulator and facilitate collaboration on improvements or extensions.

Acknowledge

The research group FCQ-GI-23-001 acknowledge the Secretary of Research and Postgraduate Studies of the Faculty of Chemical Sciences, Universidad Autónoma de Chihuahua, for the support to establish the research group.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that there are no known financial conflicts of interest or personal relationships that could have influenced the research presented in this paper.

References

- Baldea, M., & Edgar, T. F. (2018). Dynamic process intensification. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 22: 48–53. <https://doi.org/10.1016/J.COCHENG.2018.08.003>
- Dassault Systèmes. (2024). *Xcos | Scilab*. <https://www.scilab.org/download/scilab-2024.1.0>
- Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trabaly, E., Escudie, R., Lens, P. N. L., & Esposito, G. (2015). A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. *Applied Energy*, 144: 73–95. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.045>
- Hedengren, J. D. (2024). *Process Dynamics and Control*. <https://apmonitor.com/che436/>
- Henrique, J. P., de Sousa, R., Secchi, A. R., Ravagnani, M. A. S. S., & Costa, C. B. B. (2018). Optimization of chemical engineering problems with EMSO software. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(1): 141–161. <https://doi.org/10.1002/CAE.21867>
- Hu, C. (2021). Reactor design and selection for effective continuous manufacturing of pharmaceuticals. *Journal of Flow Chemistry* 11:3: 243–263. <https://doi.org/10.1007/S41981-021-00164-3>
- Jin, H. Z., Gu, Y., & Ou, G. F. (2021). Corrosion risk analysis of tube-and-shell heat exchangers and design of outlet temperature control system. *Petroleum Science*, 18(4): 1219–1229. <https://doi.org/10.1016/J.PETSCI.2021.07.002>
- Minh, V. T. (2010). Modeling and control of distillation column in a petroleum process. *Proceedings of the 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Taichung, Taiwan, ICIEA 2010*: 259–263. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2010.5516816>
- MIT OpenCourseWare. (2006). *Process Dynamics, Operations, and Control*. © 2001–2025 Massachusetts Institute of Technology. <https://ocw.mit.edu/courses/10-450-process-dynamics-operations-and-control-spring-2006/>

- Moodley, K. (2020). Improvement of the learning and assessment of the practical component of a Process Dynamics and Control course for fourth year chemical engineering students. *Education for Chemical Engineers*, 31: 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.ECE.2020.02.002>
- Muhammad, D., Ahmad, Z., & Aziz, N. (2019). Low density polyethylene tubular reactor control using state space model predictive control. *Chemical Engineering Communications*, 208(4): 500–516. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1674816>
- Pugazhendi, A., Qari, H., Al-Badry Basahi, J. M., Godon, J. J., & Dhavamani, J. (2017). Role of a halothermophilic bacterial consortium for the biodegradation of PAHs and the treatment of petroleum wastewater at extreme conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 121: 44–54. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2017.03.015>
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle III, F. J. (2016). *Process Dynamics and Control* (Fourth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Shi, Y., Prieto, P. L., Zepel, T., Grunert, S., & Hein, J. E. (2021). Automated Experimentation Powers Data Science in Chemistry. *Accounts of Chemical Research*, 54(3): 546–555. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00736>
- Shokry, A., Baraldi, P., Zio, E., & Espuña, A. (2020). Dynamic Surrogate Modeling for Multistep-ahead Prediction of Multivariate Nonlinear Chemical Processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(35): 15634–15655. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00729>
- The MathWorks, Inc. (2025). *Simulink Online - MATLAB & Simulink*. <https://la.mathworks.com/products/simulink-online.html>
- Vieira, E. B., Busch, W. F., Prata, D. M., & Santos, L. S. (2019). Application of Scilab/Xcos for process control applied to chemical engineering educational projects. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(1): 154–165. <https://doi.org/10.1002/CAE.22065>
- Wang, D., Yang, G., Guo, F., Wang, J., & Jiang, Y. (2018). Progress in Technology and Catalysts for Continuous Stirred Tank Reactor Type Slurry Phase Polyethylene Processes. *Petroleum Chemistry*, 58(3): 264–273. <https://doi.org/10.1134/S0965544118030064>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Sintonización y evaluación de observadores lineales proporcionales Luenberger mediante asignación de polos para la cristalización por lotes

Tuning and evaluation of proportional linear Luenberger observers by pole placement for batch crystallization

Maximiliano López-Morales¹, María de Jesús García-Gómez⁴, Cirilo Nolasco-Hipólito⁴, Raúl Colorado-Peralta⁴, Oscar Núñez-Gaona⁴, Alfonso Flores-Meza³, Jesús Carrillo-Ahumada^{4*}

¹ Centro de Investigaciones Científicas, Instituto de Biotecnología, Universidad del Papaloapan, Circuito Central 200 Parque Industrial, San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, México.

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prolongación de Oriente 6, No. 1009, C.P. 94340, Orizaba, Veracruz, México.

³ Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec. Ciudad Universitaria S/N, Barrio Santa Cruz, 4^a. Sección, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México, C.P. 70760.

⁴ Universidad del Papaloapan, Circuito Central 200, colonia Parque Industrial, Tuxtepec, Oax. 68301, México.

*Correspondencia: jesuscarrillo18@yahoo.com (Jesús Carrillo Ahumada)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1918>

Recibido: 29 de abril de 2025; **Aceptado:** Fecha de aceptación 23 de junio de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dra. Luz Araceli Ochoa Martínez

Resumen

La cristalización es una operación unitaria ampliamente utilizada en diversos sectores industriales, como en la obtención de productos farmacéuticos, alimentarios y químicos finos, donde se requiere alta pureza y control del tamaño de partícula. Aunque ofrece ventajas operativas significativas, también presenta desafíos en el monitoreo de variables. El monitoreo en línea de la cristalización suele requerir instrumentación costosa y técnicamente compleja. Una alternativa viable es el uso de observadores lineales proporcionales Luenberger (OLPLs), herramientas basadas en software derivadas de modelos matemáticos que representan el proceso. Este estudio tuvo como objetivo diseñar observadores lineales proporcionales Luenberger (OLPLs) mediante una metodología de asignación de polos. El sistema propuesto se basó en el modelo de Mesbah et al. (2011) para la cristalización de sulfato de amonio y agua. A diferencia de los observadores mostrados por Mesbah et al., (2011), el presente estudio muestra como un OLPLs correctamente sintonizado, puede estimar con precisión todos los estados cuando son medibles. Como resultado, se obtuvo un conjunto de OLPLs, y se seleccionó el de mejor desempeño con base en métricas de rendimiento específicas,

obteniendo resultados satisfactorios. Este trabajo contribuye al desarrollo de alternativas eficientes y de bajo costo para el monitoreo de la cristalización en aplicaciones industriales.

Palabras clave: procesos industriales, ingeniería de procesos, observadores de estado, simulación.

Abstract

Crystallization is a widely used unit operation in various industrial sectors, such as in the production of pharmaceutical, food, and fine chemical products, where high purity and precise particle size control are required. While it offers significant operational advantages, it also presents challenges in variable monitoring. Online crystallization monitoring often requires expensive and technically complex instrumentation. A viable alternative is the use of proportional linear Luenberger observers (PLLOs), which are software-based tools derived from mathematical models representing the process. This study aimed to design proportional linear Luenberger observers (PLLOs) using a pole placement methodology. The proposed system was based on the model by Mesbah et al. (2011) for ammonium sulfate and water crystallization. Unlike the observers presented by Mesbah et al. (2011), the present study demonstrates how a properly tuned proportional Luenberger observer (PLLOs) can accurately estimate all states when they are measurable. As a result, a set of PLLOs was obtained, and the best-performing one was selected based on specific performance metrics, demonstrating satisfactory results. This work contributes to the development of cost-effective and reliable alternatives for crystallization monitoring in industrial applications.

Keywords: industrial processes, process engineering, state observer, simulation.

1. Introducción

La cristalización es una operación unitaria utilizada para la separación de un soluto presente en una mezcla mediante la formación de partículas (cristales), obteniendo así un producto con un alto nivel de pureza. Se realiza a partir de una solución sobresaturada, y en muchos casos se emplean métodos adicionales como evaporación, enfriamiento, adición de solventes o precipitantes para inducir la nucleación y el crecimiento de los cristales (Nagy y Braatz, 2012). La cristalización juega un papel clave en la separación y purificación de sustancias en procesos industriales, ya sea en etapas intermedias o finales (Lewiner et al., 2002).

Este proceso tiene múltiples aplicaciones en la industria:

- Industria farmacéutica: Obtención de paracetamol (Lima et al., 2024; Kalakech et al., 2025), L-alanina (Albert et al., 2024) y naproxeno (Barzegar-Jalali et al., 2024).
- Industria alimentaria: Producción de ácido succínico (Hutagaol et al., 2025), lactosa (Wen et al., 2025), cristalización de soluciones de caña de azúcar (Sánchez-Sánchez et al., 2020; Morales et al., 2024; Karimidatsjerd et al., 2025) y cristalización de azúcar de remolacha (Piri et al., 2024).
- Industria agropecuaria: Producción de fertilizantes como el ácido glutámico (Sun et al., 2024; Song et al., 2025) y obtención del ácido amino-benzoico (Hussain et al., 2024).

- Industria química: Obtención de sulfato de potasio (K_2SO_4) y nitrato de potasio (KNO_3) (Kim et al., 2023; Xu et al., 2024).

En los procesos de cristalización y en otros procesos particulados, la distribución del tamaño de partícula (DTC) influye directamente en la calidad del producto final. Actualmente, el monitoreo en línea de la cristalización requiere instrumentación costosa y representa un reto para los ingenieros de proceso. Una alternativa viable para el monitoreo de la cristalización son los observadores de estado, herramientas basadas en software diseñadas a partir de modelos matemáticos que representan el proceso. Aunque existen metodologías para la estimación de parámetros en cristalizadores con ruido blanco, como el filtro de Kalman (Liu et al., 2022), en este trabajo se utiliza el observador Luenberger con el objetivo de establecer una metodología de sintonización. La motivación de este estudio es desarrollar una metodología para la sintonización de observadores Luenberger mediante la asignación estructurada de ganancias. Se propone la sintonización de observadores lineales proporcionales Luenberger (OLPLs) mediante una metodología de colocación de polos para la estimación de parámetros no medibles directamente en la cristalización de sulfato de amonio y agua.

Se partió de un modelo no lineal propuesto por Mesbah et al. (2011), que fue posteriormente linealizado para facilitar su estudio. Se utilizó la fórmula de Ackermann para la sintonización de observadores y se diseñaron observadores considerando la minimización del error de convergencia. Finalmente, se evaluó el desempeño del sistema-observador mediante métricas específicas. El documento está organizado de la siguiente manera: La Sección 2 está dividida en dos partes. La primera describe las generalidades de los observadores de estado, con un enfoque específico en los observadores de Luenberger con estructura proporcional, su sintonización, métricas de evaluación y aplicación en cristalización. La segunda parte detalla el sistema de estudio propuesto por Mesbah et al. (2011). La Sección 3 presenta la metodología utilizada para la sintonización y evaluación de los observadores. En la Sección 4 se exponen los resultados obtenidos, incluyendo la linealización del sistema no lineal, la generalización del conjunto de observadores proporcionales (OP), la simulación y la evaluación del caso de estudio-observador. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

2.1.1 Observadores de estado

El concepto de observabilidad es fundamental en diversas áreas de la cristalización, como el control automático (Chiu y Christofides, 1999 (a, b); El-Farra et al., 2004; Montes et al., 2021) y la estimación de parámetros (Brivadis et al., (2020, 2021)). Para sistemas lineales determinísticos, uno de los observadores más utilizados es el observador tipo Luenberger, debido a su simplicidad estructural, bajo costo computacional y su capacidad para reconstruir con precisión las variables de estado. Este tipo de observador se diseña de modo que el error de estimación entre el sistema real y el sistema estimado, definido como:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad \text{Ec. (1)}$$

converja a cero en forma asintótica bajo ciertas condiciones de diseño. Esta propiedad garantiza un comportamiento estable y preciso, incluso ante incertidumbres iniciales. Su bajo requerimiento computacional lo hace ideal para implementaciones en tiempo real, especialmente en entornos industriales con recursos limitados.

2.1.2 Observadores Luenberger

El diseño de este tipo de observadores está basado en el conocimiento completo del modelo dinámico del sistema, y puede implementarse tanto en forma de orden completo como de orden reducido. Existen diferentes configuraciones estructurales, siendo las más comunes los observadores proporcionales (P), proporcionales-integrales (PI) entre otros. En este trabajo de investigación se utilizan los observadores proporcionales (OP) debido a su estructura sencilla, fácil implementación y buena capacidad de estimación en sistemas linealizados, características que los hacen especialmente adecuados para aplicaciones industriales con restricciones computacionales.

2.1.3 Observadores Proporcionales (OP)

Se puede considerar un sistema linealizado de la siguiente forma:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad \text{Ec. (2)}$$

$$y = Cx \quad \text{Ec. (3)}$$

donde $x \in R^{n \times 1}$ es el vector de variables de estado, $u \in R^{c \times 1}$ es el vector de variables de entrada, $y \in R^{r \times 1}$ es el vector de salidas medidas que pueden ser tomadas para realizar observación y A, B y C son matrices constantes que definen la dinámica lineal del sistema. Por otro lado, la expresión del observador es la siguiente:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + K_p(y - C\hat{x}) \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde $\hat{x} \in R^{n \times 1}$ es el vector de estado estimado y $K_p \in R^{r \times r}$ es la matriz de ganancias proporcionales. La ecuación del error es:

$$\frac{de}{dt} = (A - K_p C)e \quad \text{Ec. (5)}$$

esta expresión (Ec. 5) muestra que la estabilidad del error depende de la colocación de los valores propios de la matriz $(A - K_p C)$. Por lo tanto, la selección adecuada de K_p permite garantizar la convergencia del error a cero en el tiempo, y por lo tanto su estabilidad, lo cual es fundamental para la confiabilidad del observador. Algunas metodologías para determinar K_p se basan en la ecuación de Riccati (Farza et al., 2011), en el polinomio de Butterworth y en la fórmula de Ackermann para la colocación de polos (Di Ruscio, 2009).

2.1.4 Sintonización de observadores mediante colocación de polos

Los polos del sistema en lazo cerrado se pueden colocar en cualquier ubicación deseada (bajo ciertas restricciones) mediante retroalimentación de estado a través de una matriz de ganancia de retroalimentación de estado apropiada. La colocación de polos se ha utilizado en el diseño de observadores de estado para diversas aplicaciones, como el diagnóstico de fallas en reactores CSTR (Kamatchi et al., 2021), el diseño de observadores adaptativos (Kojabadi y Chang, 2005; Volpato y Vieira 2020) y la mejora de la respuesta de salida de los sistemas.

2.1.5 Métricas de estabilidad, desempeño y sintonización

Un sistema-observador es estable si todas las partes reales de los valores propios (λ_i) de la matriz $A_{lc,p}$ son negativas. Por lo tanto:

$$Re(\lambda_i) < 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. (6)}$$

$$A_{lc,p} = (A - K_p C) \quad \text{Ec. (7)}$$

$$r = Re(\lambda_i) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$r_{in} = -r \quad \text{Ec. (9)}$$

Para realizar la evaluación de OP, se utiliza una métrica de convergencia para cada estado estimado y el estado original correspondiente:

$$e_{conv} = \sum_{i=1}^n |x_{original} - x_{estimado}| \quad \text{Ec. (10)}$$

Para la generación del conjunto y elección del observador a utilizar, se tienen los siguientes pasos: Se normalizan entre 0 y 1 todos los valores de la métrica de e_{conv} (Ec. 10) y de r (Ec. 8) del conjunto de observadores obtenidos.

a) Posteriormente, se utiliza la siguiente suma de índices:

$$W = e_{conv.1} + e_{conv.2} + \dots + e_{conv.n} + r \quad \text{Ec. (11)}$$

Proporcionando la misma ponderación para todos los índices.

b) Para la elección del observador, se utiliza al observador que tenga el mínimo valor de W (Ec. 11).

c) Para la evaluación del OP en el sistema no lineal se utiliza el error cuadrático medio normalizado:

$$ECMN = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left(\frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right)^2} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde $\hat{x}_i$ son los estados estimados, x_i son los estados del sistema, el índice i es el i -ésimo punto de datos y n representa el número de datos utilizados para el cálculo.

2.1.6 Observadores aplicados a la cristalización

Algunos trabajos de investigación que han estimado parámetros utilizando observadores para la cristalización son: estimación de masa de cristales (Damour et al., 2010 (a, b)), concentración de soluto (Brivadis et al., 2020), Distribución del Tamaño de Cristal (DTC) (Brivadis et al., 2020; Brivadis y Sacchelli, 2021; Kamatchi Kannan et al., 2021), tamaño medio de los cristales (Farza et al., 2011; Afsi et al. 2020), y control mediante el uso de observadores (Rigatos et al., 2020).

2.1.7 Sistema de estudio: Cristalizador propuesto por Mesbah et al. (2011)

Las características que debe poseer un modelo matemático para la operación unitaria de la cristalización según Rawlings et al., 1993 son: balance de población, balance de materia y energía y relaciones constitutivas (crecimiento y nucleación). De manera general el balance de población se puede describir como:

$$\frac{\partial nV}{\partial t} + V \frac{\partial Gn}{\partial L} + VB_0 \delta(L - L_0) - \sum_k Q_k n_k \quad \text{Ec. (13)}$$

Con la condición límite $n(0, t) = \frac{B_0}{G|_{L=0}}$, donde t es el tiempo, n es la densidad de población, V es el volumen, G es la velocidad de crecimiento, L es la longitud de cristal, $\delta(L - L_0)$ es la delta de Dirac actuando en $L = L_0$, Q_k y n_k es la velocidad de flujo volumétrico y la función de DTC de la k -ésima corriente, respectivamente. La Ec. (13) puede ser resuelta por medio de la metodología del elemento finito, o bien mediante la técnica de momentos. La técnica de momentos ha permitido obtener la solución de la Ec. (13) en un número menor de ecuaciones diferenciales que las técnicas de discretización. La técnica de momentos ha tenido la siguiente generalización:

- Cristalización por lotes a vacío con variación de volumen (Carrillo-Ahumada, 2006):

$$\frac{d\mu_0}{dt} = B_0, \frac{d\mu_i}{dt} = iG\mu_{i-1}(1 + \ln(V)) \text{ para todo } i = 1, \dots, n.$$

- Cristalización por lotes sin variación de volumen (Nagy et al., 2008; Sanzida y Nagy, 2013):

$$\frac{d\mu_0}{dt} = B_0, \frac{d\mu_i}{dt} = iG\mu_{i-1} + Br_0^i \text{ para todo } i = 1, \dots, n \text{ donde } r \text{ es el tamaño de cristales.}$$

- Cristalización por lotes y operación isotérmica (Zhang y Rohani, 2003):

$$\frac{d\mu_0}{dt} = B_0, \frac{d\mu_i}{dt} = iG\mu_{i-1}$$

- Cristalización por lotes considerando volumen (Mesbah et al., 2011):

$$\frac{d\mu_0}{dt} = B_0 - \frac{\mu_0 Q_p}{V}, \frac{d\mu_i}{dt} = iG\mu_{i-1} - \frac{\mu_i Q_p}{V} \quad \text{Ec. (14)}$$

El modelo descrito por Mesbah et al. (2011) representa a la DTC (μ_i) y a la concentración de soluto (C) en forma de ecuaciones diferenciales. Las expresiones matemáticas empíricas para la velocidad de nucleación total y la velocidad de crecimiento de cristal independiente del tamaño son:

$$B_0 = k_b \mu_3 G \quad \text{Ec. (15)}$$

$$G = k_g (C - C^*)^g \quad \text{Ec. (16)}$$

Cabe mencionar que la fuerza motora para la creación de cristales es la sobresaturación. El conjunto de ecuaciones descrito en Ec. (14) puede ser rescrito por la técnica de pesos residuales como:

$$\frac{d\mu_0}{dt} = B_0 - \frac{\mu_0 Q_p}{V} \quad \text{Ec. (17)}$$

$$\frac{d\mu_1}{dt} = G\mu_0 - \frac{\mu_1 Q_p}{V} \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\frac{d\mu_2}{dt} = 2G\mu_1 - \frac{\mu_2 Q_p}{V} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$\frac{d\mu_3}{dt} = 3G\mu_2 - \frac{\mu_3 Q_p}{V} \quad \text{Ec. (20)}$$

$$\frac{d\mu_4}{dt} = 4G\mu_3 - \frac{\mu_4 Q_p}{V} \quad \text{Ec. (21)}$$

Las condiciones iniciales son $\mu_i(t_0) = \mu_{i,0}$ y $C(t_0) = C_0$. Debido a que el proceso se lleva a cabo en una operación isotérmica del cristalizador mediante evaporación, las ecuaciones de balance de masa y energía pueden ser simplificadas a expresiones para la concentración de soluto:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{k_0 + 3K_v G \mu_2 (k_1 + C)}{(1 + k_v \mu_3)} + \frac{k_2 H_{in}}{1 + K_v \mu_3} \quad \text{Ec. (22)}$$

Con las ecuaciones algebraicas:

$$k_0 = \frac{Q_p (C^* - C)}{V} \quad \text{Ec. (23)}$$

$$k_1 = \frac{H_v C^*}{H_v - H_L} \left(\frac{\rho_C}{\rho_L} - 1 + \frac{\rho_L H_L - \rho_C H_C}{\rho_L H_v} \right) - \frac{\rho_C}{\rho_L} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$k_2 = \frac{C^*}{V \rho_L (H_v - H_L)} \quad \text{Ec. (25)}$$

Los detalles de los parámetros que describen al modelo son mostrados en la sección Nomenclatura.

2.2 Métodos

En este trabajo de investigación, se considera que todas las salidas son medibles en el proceso de cristalización. A partir de esta consideración, se implementó un algoritmo iterativo basado en la asignación progresiva de polos para sintonizar observadores proporcionales tipo Luenberger

(OLPLs) y evaluar su desempeño. La metodología se compone de los siguientes pasos, los cuales se describen a continuación:

Algoritmo. Sintonización y evaluación de OLPLs para el proceso de cristalización.

1: Inicio

Se definieron los objetivos y se seleccionó el modelo dinámico del cristizador. Posteriormente se programó en Matlab™, las rutinas numéricas para realizar la linealización del sistema, la generación del conjunto de observadores, y la evaluación de su desempeño mediante simulaciones en el dominio del tiempo.

2: Linealizar el modelo no lineal del cristizador propuesto por Mesbah et al. (2011), Ecs. (17)-(25).

El modelo de Mesbah et al. (2011) fue linealizado, es decir, se aproximó el sistema original a ecuaciones más simples que lo representan cerca de un punto de operación en específico, considerando las condiciones iniciales del proceso. Por lo tanto, se obtuvo un sistema en forma matricial $\frac{dx}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$ e $\mathbf{y} = \mathbf{Cx}$ lo cual es necesario para el diseño de observadores lineales.

3: Determinar los valores propios de la matriz característica del sistema (r) (Ec. 8).

Se calcularon los valores propios de la matriz $\mathbf{A}$ como referencia inicial para diseñar una familia de observadores con diferentes velocidades de convergencia.

4: Asignar un valor inicial de incremento de los valores propios de la matriz característica (j).

Se estableció un rango de incremento desde 0 % hasta 100 % aplicado sobre los valores propios del sistema. En cada iteración, se generó un nuevo conjunto de polos deseados al multiplicar los valores originales por un factor de escala j , el cual se aumentó progresivamente en tamaño de paso de 0.05.

5: Mientras.

Los valores propios iniciales $\leq$ los valores propios incrementados al 100 % ($r_{in} \leq r_{in}(j)$). Se implementó una estructura iterativa en la cual los valores propios del sistema se modificaron progresivamente. En cada iteración, se generó un nuevo conjunto de polos incrementando los valores propios originales por un factor de escala j , lo que permitió explorar como distintas colocaciones de polos afectan la dinámica del observador. El proceso se repitió hasta alcanzar un incremento máximo del 100%.

6: Incrementar j ($j = j + 0.05$).

En cada iteración del algoritmo, el valor del factor j se incrementó con un tamaño de paso de 0.05. Este tamaño de paso aseguró una cobertura del espacio de los polos posibles, manteniendo el control sobre la velocidad de convergencia del error de estimación.

7: Fin-mientras.

El bucle de iteración se detuvo una vez que el incremento j alcanzó el valor máximo establecido (100 %). Con ello se generó un conjunto completo de observadores proporcionales con polos ubicados en diferentes espacios.

8: Evaluar el desempeño del conjunto de OP (Ec. 10) en el dominio del tiempo con un intervalo de 0 a 1000 s.

Cada observador fue evaluado mediante simulaciones en el dominio del tiempo. Se utilizó una métrica definida en la Ec. (10) para calcular el error de convergencia entre los estados reales y los estimados por cada observador.

9: Seleccionar el observador, considerando el mínimo valor de la Ec. (11).

Para cada observador, se calculó el índice de desempeño W (Ec. 11) que combina el error de estimación y la magnitud del desplazamiento aplicado. Se seleccionó el observador que presentó el menor valor de W , considerándolo como el óptimo para el sistema-observador.

10: Fin.

Con el observador óptimo identificado, el procedimiento concluyó. Este observador fue posteriormente aplicado y evaluado dentro del modelo no lineal del cristizador para validar su desempeño y robustez.

3. Resultados y discusión

3.1 Caso de estudio

Para la aplicación del OLPL en el sistema propuesto por Mesbah et al., (2011) se considera el siguiente caso de estudio. En el modelo no lineal, Ecs. (17)-(22) y sus ecuaciones complementarias (Ecs. (23)-(25)), el estado seis (concentración de soluto, C) se encuentra disponible para una medición directa. Aunque no forma parte del vector de estados estimados por el observador, su disponibilidad permite incorporarla en el proceso de linealización del modelo para definir adecuadamente las matrices dinámicas del sistema.

3.2 Linealización del modelo no lineal

Se considera que el modelo descrito por las Ecs. (17)-(25) pueden ser generalizado por Ecs. (2)-(3). Donde $\mathbf{x}' = (\mu_0, \dots, \mu_4, C)$ son las variables de estado, $\mathbf{u} = H_{in}$ es la entrada al sistema. Considerando para la linealización, los siguientes valores en estado estacionario: Los valores iniciales de los momentos de la DTC se consideraron como $\mu_{0s} = \mu_{1s} = \mu_{2s} = \mu_{3s} = \mu_{4s} = 0.001$, ya que en las etapas iniciales del proceso estos momentos suelen presentar valores muy pequeños. Por otro lado, $C_s = 0.5$, $H_{ins} = 9.0$ se seleccionaron considerando que se encuentran dentro de los rangos operativos utilizados por Mesbah et al., (2011).

Cabe destacar que, si bien la concentración de soluto (C) no forma parte del vector de estados estimados por el observador, se utilizó durante el proceso de linealización para definir adecuadamente la estructura de las matrices dinámicas $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ y $\mathbf{C}$. En particular, aunque la concentración de soluto no es una entrada al sistema, interviene de manera funcional en la construcción de la dinámica del modelo y, por tanto, en el cálculo de las ganancias del observador. Esta consideración permite preservar la coherencia entre el modelo linealizado y el comportamiento del sistema no lineal original. Por lo tanto, las matrices en espacio de estado son definidas como:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{61} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}_{(5 \times 5)} &= \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{Ec. (26)}$$

donde $a_{11} = -5.82 \times 10^{-5}$, $a_{21} = 3.0 \times 10^{-6}$, $a_{22} = -2.30 \times 10^{-5}$, $a_{32} = 6.0 \times 10^{-6}$, $a_{33} = -2.30 \times 10^{-5}$, $a_{43} = 9.0 \times 10^{-6}$, $a_{44} = -2.30 \times 10^{-5}$, $a_{54} = -2.30 \times 10^{-5}$, $a_{64} = 7.14 \times 10^{-6}$, $a_{55} = -2.30 \times 10^{-5}$; $b_{61} = 1.94 \times 10^{-6}$ con los valores de las matrices (Ec. 26) es posible obtener el conjunto de OLPLs.

3.3 Generación del conjunto de OP

Después de aplicar la metodología descrita anteriormente, se generó un conjunto de OLPLs, en los cuales cada observador comparte la misma estructura: Una matriz de ganancias $\mathbf{K}_p$ de tipo diagonal ($\text{Diag}(\mathbf{K}_p(i, i))$ para $i = 1, \dots, 5$). Para cada incremento, aplicado a los valores propios del sistema, se construyó un nuevo observador y se evaluó su desempeño mediante simulaciones en el dominio del tiempo. Estas simulaciones se resolvieron utilizando el método de Runge-Kutta 4to orden, con las condiciones iniciales del sistema: $\mu_{0s} = \mu_{1s} = \mu_{2s} = \mu_{3s} = \mu_{4s} = 0.001$ y $C_s = 0.5$. El desempeño de cada observador se evaluó utilizando el índice $\mathbf{W}$ definido en la Ec. (11), y se registraron los valores correspondientes a la diagonal de $\mathbf{K}_p$ y los incrementos aplicados sobre los valores propios. Estos resultados son mostrados en la Fig. (1).

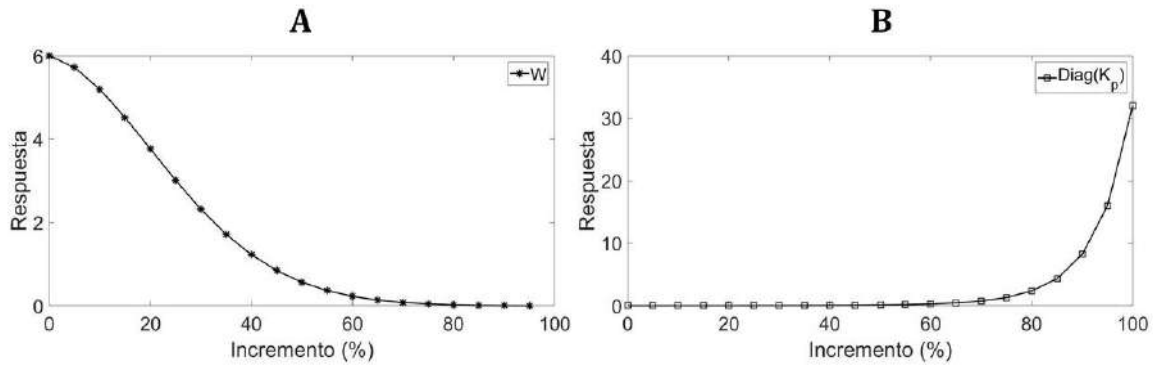


Figura. 1. Respuesta del sistema ante diferentes incrementos porcentuales. La subfigura (A) muestra la evolución de la sumatoria de índices W , mientras que (B) presenta la respuesta de la diagonal de la matriz de ganancias proporcionales $\text{Diag}(K_p)$.

Figure. 1. System response to different percentage increments. Subfigure (A) shows the evolution of the summation of indices W , while (B) presents the response of the proportional gain matrix diagonal $\text{Diag}(K_p)$.

Como se observa en la Fig. 1, conforme se incrementa los valores propios de la matriz característica, el valor de W disminuye, aunque con un incremento del 100 % el valor de este índice tiende al peor desempeño del sistema-observador. Por otro lado, el valor de la diagonal de K_p se incrementa. Por lo tanto, conforme a la elección del observador se propone el que presenta un valor de $W = 0$, $\text{Diag}(K_p) = 15.99$ y un incremento de 95 %.

Este resultado confirma que, a diferencia de estrategias con observadores no estructurados como los utilizados por Mesbah et al. (2011), un OLPL adecuadamente sintonizado puede mantener estabilidad incluso ante incrementos agresivos en los polos. Además, la estabilidad obtenida en este punto sugiere que la selección automática basada en el índice W es una alternativa eficiente frente a métodos empíricos tradicionalmente empleados en el diseño de observadores.

3.4 Simulación y evaluación del sistema no lineal-observador

Para validar la estimación del conjunto de OLPLs, se realizaron diferentes simulaciones numéricas en dominio del tiempo ($0 \leq t \leq 1000$ s) del sistema no lineal (Ecs. (17)-(22)) con las condiciones iniciales originales ($\mu_{0s} = \mu_{1s} = \mu_{2s} = \mu_{3s} = \mu_{4s} = 0.001$) con el siguiente conjunto de condiciones iniciales para el observador:

$$\text{CI1: } \hat{\mu}_{0s} = \hat{\mu}_{1s} = \hat{\mu}_{2s} = \hat{\mu}_{3s} = \hat{\mu}_{4s} = 0.001.$$

$$\text{CI2: } \hat{\mu}_{0s} = 3.49 \times 10^9, \hat{\mu}_{1s} = 7.0 \times 10^5, \hat{\mu}_{2s} = 282.11, \hat{\mu}_{3s} = 0.1708, \hat{\mu}_{4s} = 0.0011 \text{ (se eligieron en base al valor máximo del sistema en lazo abierto).}$$

Las ecuaciones que describen al observador con el sistema no lineal son las siguientes:

$$\frac{d\hat{\mu}_0}{dt} = B_0 - \frac{\hat{\mu}_0 Q_p}{V} + K_{p,(1,1)}(\mu_0 - \hat{\mu}_0) \quad \text{Ec. (27)}$$

$$\frac{d\hat{\mu}_1}{dt} = G\hat{\mu}_0 - \frac{\hat{\mu}_1 Q_p}{V} + K_{p,(2,2)}(\mu_1 - \hat{\mu}_1) \quad \text{Ec. (28)}$$

$$\frac{d\hat{\mu}_2}{dt} = 2G\hat{\mu}_1 - \frac{\hat{\mu}_2 Q_p}{V} + K_{p,(3,3)}(\mu_2 - \hat{\mu}_2) \quad \text{Ec. (29)}$$

$$\frac{d\hat{\mu}_3}{dt} = 3G\hat{\mu}_2 - \frac{\hat{\mu}_3 Q_p}{V} + K_{p,(4,4)}(\mu_3 - \hat{\mu}_3) \quad \text{Ec. (30)}$$

$$\frac{d\hat{\mu}_4}{dt} = 4G\hat{\mu}_3 - \frac{\hat{\mu}_4 Q_p}{V} + K_{p,(5,5)}(\mu_4 - \hat{\mu}_4) \quad \text{Ec. (31)}$$

La respuesta por simulación de las ecuaciones del observador (Ecs. (27)-(32)) en dominio del tiempo es mostrado en las Figs (2)-(3). Como se observa en las Figs. (2)-(3), la simulación se realizó en dominio del tiempo $0 \leq t \leq 1000$ s. La convergencia entre los estados originales y los seis estados estimados ($\mu_0, \dots, \mu_4$) independientemente de la condición inicial (CI1 o CI2) se alcanza en un valor del tiempo menor de 1 segundo. Para evaluar el desempeño se utiliza la Ec. (12) para cada estado original y su respectivo estado estimado considerando CI1 y CI2 (Tabla I). Este tipo de respuesta rápida en estimación, independientemente de la condición inicial, es deseable en aplicaciones industriales donde se requiere reacción inmediata ante fluctuaciones del proceso. Resultados similares en robustez ante condiciones iniciales han sido reportados en controladores adaptativos como se observa en Kamatchi et al. (2021) y Carrillo-Ahumada (2006) ambos trabajos para aplicados a cristalización.

Tabla 1. Evaluación de la convergencia del estado original y el estado estimado.

Table 1. Evaluation of the convergence of the original state and the estimated state.

CI	ECMN1	ECMN2	ECMN3	ECMN4	ECMN5
1	0	0	0	0	0
2	3.49×10^{12}	7.0×10^8	2.93×10^5	176.36	0.1039

En la Tabla I se verifica de nuevo la convergencia que tienen todos los estados estimados hacia el estado original debido a que los valores mostrados en esta tabla son las condiciones iniciales que se utilizaron (CI1 o CI2). Por lo que se considera que este observador presenta un buen desempeño y robustez.

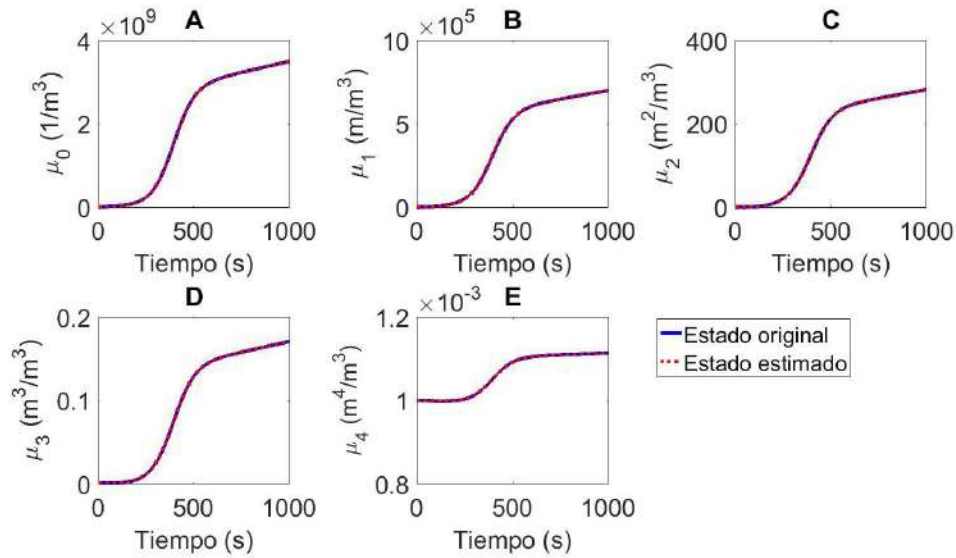


Figura. 2. Estimación de los momentos de la distribución de tamaño de cristal (DTC) bajo el conjunto de condiciones iniciales 1 (CI1). Las subfiguras muestran los resultados correspondientes al (A) momento cero, (B) momento uno, (C) momento dos, (D) momento tres y (E) momento cuatro.

Figure. 2. Estimation of the moments of the crystal size distribution (CSD) under initial condition set 1 (CI1). Subfigures show the results for the (A) zeroth moment, (B) first moment, (C) second moment, (D) third moment, and (E) fourth moment.

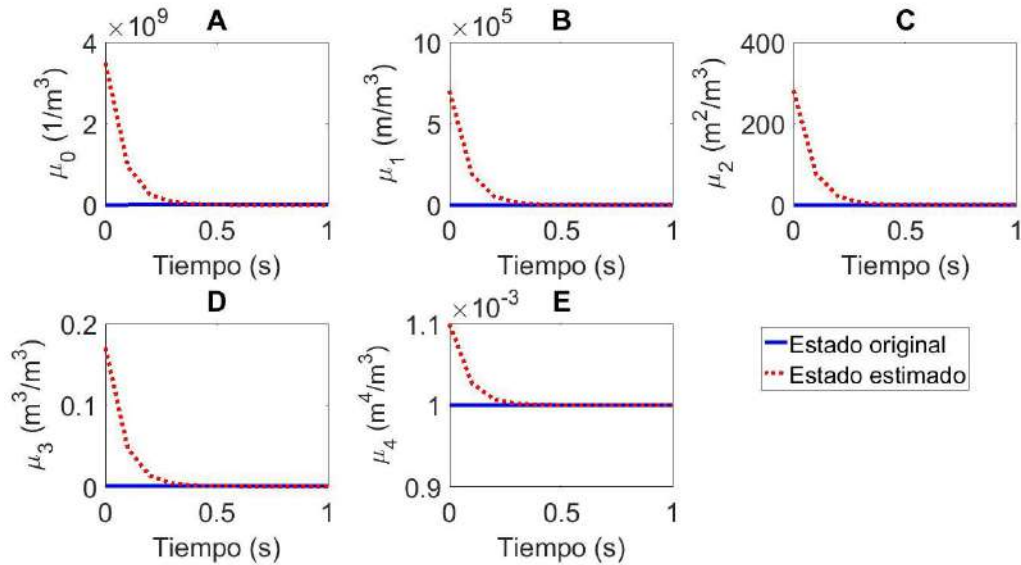


Figura. 3. Estimación de los momentos de la distribución de tamaño de cristal (DTC) bajo el conjunto de condiciones iniciales 2 (CI2). Las subfiguras muestran los resultados correspondientes al (A) momento cero, (B) momento uno, (C) momento dos, (D) momento tres y (E) momento cuatro.

Figure. 3. Estimation of the moments of the crystal size distribution (CSD) under initial condition set 2 (CI2). Subfigures show the results for the (A) zeroth moment, (B) first moment, (C) second moment, (D) third moment, and (E) fourth moment.

Además de las ecuaciones descritas por Mesbah et al., (2011), se puede utilizar el momento hipotético cinco con condición inicial $\mu_{5s} = 0.001$, descrito continuación:

$$\frac{d\mu_5}{dt} = 5G\mu_4 - \frac{\mu_5 Q_p}{V} \quad \text{Ec. (32)}$$

La desviación estándar y el diámetro promedio del cristal se calculan con las Ec. 32 y Ec. 33 (Hicks y Chope, 1999):

$$D(4,3) = \frac{\mu_4}{\mu_5} \quad \text{Ec. (33)}$$

$$S(4,3) = \sqrt{\left(\frac{\mu_5}{\mu_3}\right) - \left(\frac{\mu_4}{\mu_3}\right)^2} \quad \text{Ec. (34)}$$

estos parámetros son mostrados en la Fig (4). Aunque el presente trabajo se basa en el modelo dinámico propuesto por Mesbah et al. (2011) para la cristalización por lotes, no es posible realizar una comparación cuantitativa directa entre ambos estudios debido a que se emplean enfoques diferentes tanto en la estimación de estados como en la estructura de los observadores. Además, en el presente estudio se utilizan observadores lineales, los cuales son más sencillos de implementar en entornos industriales reales, donde los recursos de cómputo o el diseño de tiempo son limitados.

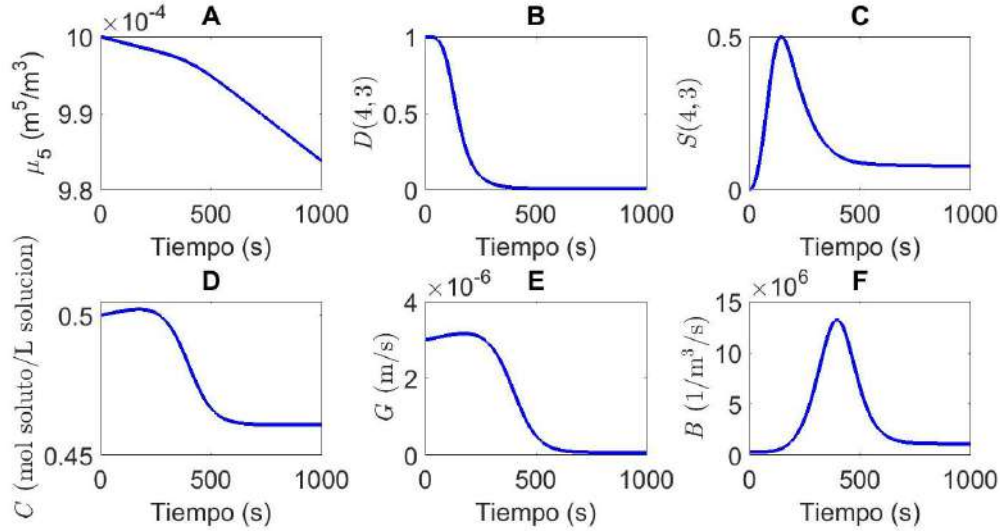


Figura. 4. Respuesta del sistema no lineal. Las subfiguras muestran: (A) el momento cinco, (B) el diámetro promedio de la DTC $D(4,3)$, (C) la desviación estándar $S(4,3)$, (D) la concentración del soluto, (E) la velocidad de crecimiento y (F) la velocidad de nucleación.

Figure. 4. Response of the nonlinear system. Subfigures show: (A) the fifth moment, (B) the average diameter of the CSD $D(4,3)$, (C) the standard deviation $S(4,3)$, (D) the solute concentration, (E) the growth rate, and (F) the nucleation rate.

Con lo que se observa que en $t < 250$ s el valor C y G presentan un comportamiento decreciente (Fig. 4D y 4E), por otro lado, B alcanza un punto máximo en $400 \leq t \leq 600$ s (Fig. 4F).

4. Conclusiones

Mediante la metodología propuesta en este trabajo de investigación es posible sintonizar observadores de estado proporcionales Luenberger a partir de la linealización de un modelo dinámico del proceso de cristalización por lotes. Los resultados obtenidos muestran se puede elegir un observador de un conjunto, con estabilidad y buen desempeño para el sistema en lazo cerrado. El enfoque desarrollado, aunque aplicado específicamente al proceso de cristalización de sulfato de amonio en solución acuosa, puede extenderse a otras operaciones unitarias en las que existan modelos matemáticos confiables, pero con limitaciones en la medición directa tales como fermentación, secado, entre otros. En conjunto, los resultados numéricos muestran no solo la viabilidad del diseño propuesto, sino su adaptabilidad ante condiciones variadas. La incorporación del momento cinco y los cálculos de la DTC agregan un análisis útil para aplicaciones reales, y refuerzan lo reportado por la comunidad de control de procesos sobre la importancia de controlar la distribución del tamaño de cristal en sistemas de cristalización. Como trabajo futuro, es posible utilizar OLPLs para utilizarlos junto con leyes de control en sistemas estables y también para inestables.

Nomenclatura

B_0	Velocidad de nucleación total ($\#/m^3/s$)
C	Concentración de soluto
C^*	Concentración de saturación, 0.46 kg soluto/kg solución
G	Velocidad de crecimiento del cristal (m/s)
g	Exponente de la velocidad de crecimiento de cristal específico del sistema, 1.0 adim
H_c	Calor específico del cristal, 60.75 KJ/kg
H_L	Calor específico de la solución, 69.86 KJ/kg
H_v	Calor latente de disolución, 2.56×10^3 KJ/kg
k_b	Constante de velocidad de nucleación, 1.02×10^{14} $\#/m^4$
k_g	Constante de la velocidad de crecimiento de cristal, 7.50×10^{-5} m/s
K_v	Factor de volumen adimensional, 0.43
μ_i	Momentos de DTC, m^i/m^3
μ_0	Momento cero, número total de cristales
μ_1	Momento uno, longitud de cristales
μ_2	Momento dos, área superficial de cristales

μ_3	Momento tres, volumen total de cristales
μ_4	Momento cuatro, momento hipotético para calcular la media del tamaño de cristal
μ_5	Momento cinco, momento hipotético para obtener la desviación estándar y diámetro promedio del cristal
Q_p	Velocidad de flujo de eliminación de productos no clasificados, $1.73 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
t	Tiempo, s
V	Volumen del cristalizador, $7.50 \times 10^{-2} \text{ m}^3$
ρ_c	Densidad del cristal, 767.35 kg/m^3
ρ_L	Densidad de la solución, 1248.93 kg/m^3

Contribuciones de los autores

MLM contribuyó con la metodología y experimentos computacionales; AFM y JCA realizaron la supervisión técnica y académica; RCP realizó validación experimental; MJGG, ONG, CNH y JCA contribuyeron con la estructuración del artículo.

Agradecimientos

El autor de correspondencia agradece a la Universidad el Papaloapan por el proyecto aprobado 01B-05-24-I “Análisis de cluster de diferentes reglas de sintonización de controladores PI con aplicaciones a biorreactores”.

Conflicto de interés

Todos los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses en la publicación del artículo de investigación.

5. Referencias

- Albert, H. M., Kavitha, D., Lawanya, T., Sreedhar, V. B., Thakur, S., Bireddy, S. R., ... & Gonsago, C. A. (2024). An overview of crystallization, structural, optical, dielectric, and thermal characterization methods for amino acid chloride crystals and their technological uses. *Phase Transitions*, 97(10): 641-664. <https://doi.org/10.1080/01411594.2024.2425607>
- Afsi, N., Join, C., Bakir, T., Sakly, A. & Othman, S. (2020). An intelligent proportional controller of a seeded batch crystallizer. *2020 17th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 1009–1016. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9364191>

- Barzegar-Jalali, M., Sheikhi-Sovari, A., Martinez, F., Seyfinejad, B., Rahimpour, E., & Jouyban, A. (2024). Solubility determination, mathematical modeling, and thermodynamic analysis of naproxen in binary solvent mixtures of (1-propanol/2-propanol) and ethylene glycol at different temperatures. *BMC chemistry*, 18(1): 178. <https://doi.org/10.1186/s13065-024-01291-3>
- Brivadis, L., & Sacchelli, L. (2021). Approximate observability and back and forth observer of a PDE model of crystallisation process. *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Austin, TX, USA, 2021, pp. 4436-4441. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9683245>
- Brivadis, L., Andrieu, V., Chabanon, É., Gagnière, É., Lebaz, N., & Serres, U. (2020). New dynamical observer for a batch crystallization process based on solute concentration. *Journal of Process Control*, 87: 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.12.012>
- Carrillo-Ahumada, J. (2006). Diseño y simulación de estrategias para el control no lineal de la sobresaturación en la cristalización por lotes a través de perfiles dinámicos de regulación de vacío y estimación de parámetros. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Orizaba, México. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31945.13929>
- Chiu, T., & Christofides, P. D. (1999a). Nonlinear control of particulate processes. *AIChE Journal*, 45(6): 1279–1297. <https://doi.org/10.1002/aic.690450613>
- Chiu, T., & Christofides, P. D. (1999b). Robust nonlinear control of a continuous crystallizer. *Computers & Chemical Engineering*, 23 (Supplement): S257–S260. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)80063-5](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)80063-5)
- Damour, C., Benne, M., Boillereaux, L., Grondin-Perez, B., & Chabriat, J.-P. (2010). NMPC of an industrial crystallization process using model-based observers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(5): 708–716. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.07.014>
- Damour, C., Benne, M., Grondin-Perez, B., & Chabriat, J.-P. (2010). Nonlinear predictive control based on artificial neural network model for industrial crystallization. *Journal of Food Engineering*, 99(2): 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.02.027>
- Di Ruscio, D. (2009). Linear polynomial estimator: The state observer. http://www.davidr.no/iaa2217/pensum/observer/main_observer.pdf
- El-Farra, N.H., Chiu, T.Y., & Christofides, P.D. (2004). Analysis and control of particulate processes with input constraints. *AIChE Journal*, 47(8): 1849–1865. <https://doi.org/10.1002/aic.690470815>
- Farza, M., Oueder, M., Abdenmour, R.B., & M'Saad, M. (2011). High gain observer with updated gain for a class of MIMO nonlinear systems. *International Journal of Control*, 84(2): 270–280. <https://doi.org/10.1080/00207179.2010.550014>
- Hicks T.G., & Chohey N.P. (1999). Handbook of chemical engineering, 5th ed. McGraw Hill. ISBN: 0-07-028206-4.
- Hussain, M. N., Van Meervelt, L., & Van Gerven, T. (2024). Crystallization of para-aminobenzoic acid forms from specific solvents. *CrystEngComm*, 26(11): 1647-1656. <https://doi.org/10.1039/D3CE01055D>

- Hutagaol, T. J., Liu, J., Li, M., Gao, Z., & Gong, J. (2025). Enhanced powder characteristics of succinic acid through crystallization techniques for food industry application. *Journal of Food Engineering*, 388: 112376. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112376>
- Kalakech, C., Madmar, A., Gagnière, E., Agusti, G., Mangin, D., Lafont, S., ... & Chabanon, E. (2025). Monitoring of Paracetamol Solvent-Mediated Phase Transformation in Seeded Batch Crystallization Processes. *Crystal Growth & Design*, 25(7): 2056-2070. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.cgd.4c01650>
- Kamatchi Kannan, V., Srimathi, R., Gomathi, V., Valarmathi, R., & PrithiEkammai, L.T. (2021). Investigation of unknown input observer for sensor fault diagnosis for a CSTR process. *Materials Today: Proceedings*, 45 (Part 2): 3431–3437. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.931>
- Karimidatsjerd, A., Zahedinia, S., Konar, N., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2025). Chapter Six - Application of crystallization in the sugar industry. In Jafari, S.M., & Malekjani, N. (Eds.) *Mass Transfer Operations in the Food Industry* (pp. 167-196). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819536-9.00002-3>
- Kim, S., Lee, S. Y., Chang, J. W., & Yang, D. R. (2023). Evaluation of the kinetics of unseeded batch cooling crystallization using population balance modeling: Sucrose and KNO₃ case studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 118: 544-554. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.11.038>
- Kojabadi, H. M., & Chang, L. (2005). Comparative study of pole placement methods in adaptive flux observers. *Control Engineering Practice*, 13(6): 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.07.005>
- Lewiner, F., Fevotte, G., Klein, J. P., & Puel, F. (2002). An online strategy to increase the average crystal size during organic batch cooling crystallization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(5): 1321–1328. <https://doi.org/10.1021/ie000962e>
- Lima, F. A. R. D., de Moraes, M. G. F., Grover, M. A., Barreto Junior, A. G., Secchi, A. R., & de Souza Jr, M. B. (2024). Neural Network Inverse Model Controllers for Paracetamol Unseeded Batch Cooling Crystallization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(45): 19613-19627. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c02060>
- Liu, T., Cui, Y., Wang, Y., & Nagy, Z.K. (2022). Seeded cooling crystallization process optimization of form L-glutamic acid based on variable moving horizon state estimation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(7): 2854–2866. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c03973>
- Mesbah, A., Huesman, A.E., Kramer, H.J., & Van den Hof, P.M. (2011). A comparison of nonlinear observers for output feedback model-based control of seeded batch crystallization processes. *Journal of Process Control*, 21(4): 652–666. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.11.013>
- Montes, F.C., Öner, M., Gernaey, K.V., & Sin, G. (2021). Model-based evaluation of a data-driven control strategy: Application to ibuprofen crystallization. *Processes*, 9(4): 653. <https://doi.org/10.3390/pr9040653>
- Morales, H., di Sciascio, F., Aguirre-Zapata, E., & Amicarelli, A. (2024). Crystallization Process in the Sugar Industry: A Discussion On Fundamentals, Industrial Practices, Modeling, Estimation

- and Control. *Food Engineering Reviews*, 16: 441-469. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-024-09377-3>
- Nagy, Z.K., & Braatz, R.D. (2012). Advances and new directions in crystallization control. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 3: 55–75. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-062011-081043>
- Nagy, Z.K., Fujiwara, M., Woo, X.Y., & Braatz, R.D. (2008). Determination of the kinetic parameters for the crystallization of paracetamol from water using metastable zone width experiments. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(4): 1245–1252. <https://doi.org/10.1021/ie060637c>
- Piri, A., Fanaei, A. R., & Rostampour, V. (2024). Thermodynamic Analysis of a Continuous Vacuum Pan in the Crystallization Process of Sugar Beet Syrup. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1): 2245675. <https://doi.org/10.1155/2024/2245675>
- Rawlings, J.B., Miller, S.M., & Witkowski, W.R. (1993). Model identification and control of solution crystallization processes: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32(7): 1275–1296. <https://doi.org/10.1021/ie00019a002>
- Rigatos, G., Cuccurullo, G., Siano, P., Hamida, M., & Abbaszadeh, M. (2020). Nonlinear optimal control for the industrial crystallization process, *AIP Conference Proceedings*, 2293: 310004. <https://doi.org/10.1063/5.0026524>
- Sánchez-Sánchez, K. B., Bolaños-Reynoso, E., Méndez-Contreras, J. M., & Cerecero-Enriquez, R. (2020). Effects of agitation rates over metastable zone width (MSZW) of concentration for cane sugar crystallization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2): 731–744. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Proc809>
- Sanzida, N., & Nagy, Z. K. (2013). Iterative learning control for the systematic design of supersaturation controlled batch cooling crystallisation processes. *Computers & Chemical Engineering*, 59: 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.05.027>
- Sun, F., Liu, T., Song, B., Cui, Y., Nagy, Z. K., & Findeisen, R. (2024). Multi-objective optimization based nonlinear model predictive control of seeded cooling crystallization process with application to β form L-glutamic acid. *Chemical Engineering Science*, 299: 120475. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120475>
- Song, B., Liu, T., Zhao, M., Cui, Y., Chen, J., Nagy, Z. K., & Findeisen, R. (2025). Surrogate Modeling with Sensitivity-Based Experiment Design and Process Optimization of Seeded Cooling Crystallization: A Case Study on β -Form LGA. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64 (18): 9272-9286. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04292>
- Volpato Filho, C.J., & Vieira, R.P. (2020). Pole placement design methodology of back-EMF adaptive observer for sensorless PMSM drives. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31: 84–93. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40313-019-00539-x>
- Wen, X., Lin, H., Liu, G., Ning, Y., Ren, Y., Li, C., ... & Lin, J. (2025). D-tagatose biotransformation from lactose by lactase and recombinant *Bacillus subtilis* expressing L-arabinose isomerase, and the product separation, purification and crystallization. *Food Microbiology*, 131: 104785. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2025.104785>

- Xu, H., Fu, G., Phan, D., Xiang, L., Le, T., & Zhang, L. (2024). Evaporating crystallization effect of ammonium sulfate at atmospheric pressure under the action of ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 106: 106896. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106896>
- Zhang, G., & Rohani, S. (2003). On-line optimal control of a seeded batch cooling crystallizer. *Chemical Engineering Science*, 58(9): 1887–1896. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00021-6)

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Prácticas Lean en México: Un análisis de adopción en plantas multinacionales

Lean Practices in Mexico: An Analysis of Adoption in Multinational Plants

Jesús Arturo Chávez-Pineda^{1*}

¹ TecNM-Instituto Tecnológico de Delicias. Paseo Tecnológico Km 3.5, Norte 3. C. P. 33000. Cd. Delicias Chihuahua. México

*Correspondencia: jesus.cp@delicias.tecnm.mx (Jesús Arturo Chávez-Pineda)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1975>

Recibido: 16 de junio de 2025; Aceptado: Fecha de aceptación 26 de agosto de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: M.C. Ricardo Talamás-Abbud

Resumen

El concepto de manufactura esbelta o manufactura Lean es una metodología para optimizar los procesos productivos de las empresas. El objetivo fue analizar la adopción de técnicas Lean en plantas de manufactura multinacional (PMM) en México. Se instrumentó un muestreo no probabilístico para la selección de las empresas participantes y se aplicó una encuesta a 316 gerentes y nivel de ingeniería en los sectores automotriz, aeroespacial, eléctrico/electrónico y médico. Se diseñó un cuestionario que incluyó 13 ítems y la variable de estudio fue la adopción de técnicas Lean en función del nivel de implementación y el tipo de adopción (parcial o integral). El análisis estadístico fue utilizando una escala Likert con cinco niveles. Los resultados revelan que las técnicas Lean más implementadas por las empresas se relacionan con la estabilidad operativa, como 5S, trabajo estandarizado y mantenimiento productivo total (MPT). Se observó también que, los pilares centrales del sistema de producción Toyota, como Justo a Tiempo y *Jidoka*, presentan bajos niveles de adopción. Además, aunque se observaron diferencias porcentuales entre sectores respecto a los tipos de adopción (parcial vs integral) estas no fueron estadísticamente significativas. Se concluye que la adopción de las técnicas Lean no depende estrictamente del sector industrial, sino de factores organizacionales internos, contribuyendo a la comprensión de la implementación fragmentada de Lean en contextos latinoamericanos.

Palabras clave: manufactura esbelta, rendimiento de manufactura, compañías multinacionales, Sistema de producción Toyota, análisis sectorial.

Abstract

The concept of Lean manufacturing is a methodology for optimizing companies' production processes. The objective was to analyze the adoption of lean techniques in multinational manufacturing plants (MMPs) in Mexico. A non-probability sampling was used to select participating companies, and a survey was administered to 316 managers and engineering-level personnel in the automotive, aerospace, electrical/electronic, and medical sectors. A questionnaire was designed with 13 items, and the study variable was the adoption of lean techniques based on the level of implementation and type of adoption (partial or full). Statistical analysis used a five-level Likert scale. The results reveal that the lean techniques most commonly implemented by companies are related to operational stability, such as 5S, standardized work, and total productive maintenance (TPM). It was also observed that the core pillars of the Toyota Production System, such as just-in-time and *Jidoka*, have low levels of adoption. Furthermore, although percentage differences were observed between sectors regarding the types of adoption (partial vs. comprehensive), these were not statistically significant. It is concluded that the adoption of Lean techniques does not strictly depend on the industrial sector, but rather on internal organizational factors, contributing to an understanding of the fragmented implementation of Lean in Latin American contexts.

Keywords: Lean Manufacturing, Manufacturing Performance, Multinational Companies, Toyota Production System, Sector Analysis.

1. Introducción

En las últimas décadas, en diversas plantas manufactureras se han incorporado las técnicas de manufactura esbelta (Lean Manufacturing, LM) como estrategia para mejorar su desempeño operativo (Abdallah et al., 2019; Kong et al., 2024). Esta adopción ha estado inspirada por los resultados documentados del Sistema de Producción Toyota (SPT), cuyas bases filosóficas y técnicas han sido ampliamente estudiadas (Liker, 2004). No obstante, replicar los niveles de desempeño alcanzados por Toyota ha resultado complejo. A pesar del consenso que existe sobre sus beneficios (Netland y Ferdows, 2016), muchas organizaciones experimentan dificultades significativas en su implementación, obteniendo resultados heterogéneos (Baker, 2016).

Una de las causas más recurrentes identificadas en la literatura es el enfoque fragmentado con el que suelen adoptarse las prácticas Lean. Estas son aplicadas como soluciones puntuales, desvinculadas entre sí y desprovistas de una filosofía común, lo que obstaculiza la mejora continua y contribuye a visiones reduccionistas del sistema (Lander y Liker, 2007; Belhadi et al., 2017). En lugar de comprenderse como un sistema sociotécnico que evoluciona con base en el aprendizaje colectivo, Lean es percibido frecuentemente como un conjunto de herramientas tácticas, útiles para resolver problemas operativos inmediatos (Bicheno y Holweg, 2016). Sin embargo, en el contexto mexicano persiste un vacío de investigación respecto a si las diferencias observadas en la adopción de prácticas Lean —particular o integral— responden a características estructurales del sector industrial o, más bien, a capacidades organizacionales internas. La literatura existente tiende a abordar la implementación de Lean de forma fragmentada y con escasos análisis comparativos entre sectores, lo que dificulta comprender los factores que determinan su adopción integral. Esta falta de evidencia limita el diseño de estrategias de implementación más efectivas y sostenibles, y constituye el problema central que aborda la presente investigación.

Este fenómeno ha sido abordado en una revisión sistemática realizada por Negrão et al. (2016) quienes identifican dos lagunas principales: por un lado, la tendencia a estudiar herramientas Lean de manera aislada y, por otro, la escasez de investigaciones que evalúen su adopción como un sistema integrado. Además, los autores subrayan la falta de estudios comparativos entre sectores industriales, y destacan la necesidad de incorporar modelos que consideren el grado de madurez Lean como variable de análisis. En respuesta a estas limitaciones, este estudio adopta un enfoque transversal orientado a distinguir entre adopciones parciales e integrales, y a examinar si dichas formas de adopción varían entre sectores industriales, aportando evidencia empírica desde un contexto poco explorado como el mexicano.

Desde la perspectiva de la teoría de sistemas sociotécnicos, Lean se concibe como un sistema integrado en el que interactúan de manera equilibrada los componentes técnicos —herramientas, procesos y tecnologías— y los sociales —personas, cultura y comunicación—. Kuo y Chen (2021) aplican este enfoque en el transporte marítimo de contenedores, mostrando que el valor generado por Lean se manifiesta en dimensiones operacionales, relacionales y estratégicas, y que su efectividad depende tanto de la optimización técnica como de la alineación cultural y el compromiso del capital humano, en coherencia con el modelo de la Casa del SPT. La literatura empírica (Belekoukias et al., 2014; Hernandez-Matias et al., 2020; Hardcopf et al., 2021) confirma que la infraestructura organizacional, la cultura y el liderazgo ejercen mayor influencia que el sector industrial al que pertenece la organización en los resultados operativos. En la misma línea, Liu et al. (2024) evidencian que las capacidades dinámicas moderan la relación entre prácticas Lean y desempeño, mientras que Maware y Adetunji (2019) validan que pilares como Just in Time (JIT) y *Jidoka*, combinados con la integración y capacitación del personal, generan mejoras en flexibilidad y resultados operativos. Complementariamente, Komkowski et al. (2023) destacan que la integración Lean-Industria 4.0 bajo un enfoque de capacidades dinámicas fortalece la adaptabilidad organizacional y la creación de valor sostenible.

Por otra parte, Jasti y Kodali (2014) identificaron 35 marcos conceptuales distintos sobre implementación Lean sin que exista uno dominante, lo que dificulta la comparación entre estudios. Badhotiya et al. (2024) corroboraron esta dispersión, observando que muchas organizaciones personalizan sus procesos Lean sin seguir un marco prescriptivo, razón por la cual proponen un nuevo modelo con 11 pilares y 102 elementos para estandarizar su aplicación. Es importante mencionar que son pocas investigaciones identificadas en la literatura que han utilizado el modelo integral del SPT (Maware y Adetunji, 2019) a pesar de la importancia que tiene en el origen de Lean manufacturing.

A partir de estas observaciones, este estudio adopta el modelo integral del SPT —representado mediante la Casa del SPT— como base estructural para el análisis. Este marco no solo permite evaluar de manera coherente la presencia de técnicas Lean, sino que integra principios filosóficos y técnicos, respondiendo así al llamado de la literatura a desarrollar enfoques sistemáticos y conceptualmente fundados para su implementación (Hernández y Vizán, 2013; Japan Management Association, 2018; Lean Certification Alliance, 2021;).

Dado el peso económico y estratégico de las plantas manufactureras multinacionales (PMM) en México, así como su inserción en cadenas globales de suministro, resulta pertinente explorar si el patrón de adopción Lean responde más a factores estructurales del entorno —como el tipo de industria— o a capacidades organizacionales internas. Algunos estudios sugieren que las exigencias regulatorias, tecnológicas o de volumen propias de cada sector podrían explicar las diferencias en la

adopción de Lean (Shah y Ward, 2003). Otros, en cambio, subrayan el papel decisivo de factores internos como el liderazgo, la cultura de mejora o la visión sistémica de las organizaciones (Lander y Liker, 2007; Bicheno y Holweg, 2016).

Por su parte, Danese et al. (2018) advirtieron que solo una décima parte de los estudios recientes sobre Lean se fundamenta en teorías sólidas, siendo la teoría de la contingencia, la teoría sociotécnica y la visión basada en recursos las más frecuentemente utilizadas. Recientemente, y como resultado de una brecha en la literatura, autores como Liu et al. (2024) han estudiado la relación entre las prácticas Lean y el desempeño operativo bajo la teoría de capacidades dinámicas.

En particular, la teoría de las capacidades dinámicas ofrece una vía teórica pertinente para interpretar esta problemática. Desde esta perspectiva, las organizaciones no alcanzan ventaja competitiva por el sector al que pertenecen, sino por su capacidad para aprender, adaptarse y reconfigurar sus recursos estratégicamente en entornos cambiantes (Teece et al., 1997). De forma complementaria, Komkowski et al. (2024) destacan que la integración de prácticas Lean con tecnologías de Industria 4.0, bajo un enfoque de capacidades dinámicas, fortalece la adaptabilidad organizacional y potencia la creación de valor sostenible.

En las últimas décadas, Lean Manufacturing ha evolucionado de una filosofía centrada exclusivamente en la eficiencia y la eliminación de desperdicios hacia un enfoque estratégico capaz de fortalecer la adaptabilidad y la resiliencia organizacional. Gutierrez et al. (2022) proponen un modelo que vincula las prácticas Lean —operativas y de cadena de suministro— con el desarrollo de microfundamentos de capacidades dinámicas, entendidas como la habilidad para detectar, aprovechar y transformar recursos frente a cambios en el entorno. Estas capacidades no emergen únicamente de la aplicación técnica de Lean, sino que requieren de una cultura organizacional orientada al aprendizaje y la innovación, la cual actúa como catalizador de su efectividad.

La evidencia reciente refuerza que el impacto de Lean trasciende la eficiencia operativa, posicionándolo como un habilitador de resiliencia y adaptación estratégica en entornos volátiles. Por ejemplo, la adopción de prácticas Lean impacta positivamente en el desempeño ambiental, al reducir residuos, optimizar recursos y mejorar la eficiencia operativa, aunque los efectos dependen del contexto industrial y de las herramientas aplicadas (Fortuny-Santos et al., 2025). Por su parte, Ar (2025) muestra que la combinación de Lean, capacidades dinámicas y tecnologías de Industria 4.0 incrementa la capacidad organizacional para enfrentar disrupciones severas, mientras que Csíki et al. (2023) diferencian entre capacidades dinámicas de producción (PDCs), capacidades ordinarias de producción (POCs) y rutinas de producción (PRs). Este marco explica por qué organizaciones con un nivel similar de implementación Lean obtienen resultados dispares: las PDCs impulsan la adopción de tecnologías digitales y la adaptación estratégica, las POCs se asocian con métodos Lean tradicionales y las PRs contribuyen a la estandarización, aunque no garantizan mejoras directas en el desempeño empresarial. En conjunto, esta evidencia respalda la hipótesis de que la adopción Lean está más asociada a capacidades organizacionales internas que a la pertenencia a un sector específico.

En este contexto, la digitalización industrial ha introducido la Industria 4.0 como un cambio organizacional integral que combina tecnologías digitales, automatización avanzada y análisis de datos para transformar procesos y modelos de negocio (Sony, 2018). Diversos estudios han destacado la complementariedad entre Lean e Industria 4.0. Ooi et al. (2023) evidencian que la integración de Industria 4.0 amplifica los efectos positivos de Lean sobre el desempeño económico, social y ambiental, mientras que Rossini et al. (2019) muestran que una implementación Lean madura facilita

la adopción de tecnologías digitales, las cuales, a su vez, potencian las prácticas Lean mediante automatización, análisis avanzado de datos y monitoreo en tiempo real. Esta sinergia posiciona a Lean como una plataforma estratégica para la transformación digital, integrando mejoras operativas y capacidades tecnológicas bajo un mismo marco sistémico.

La literatura reciente ha reforzado este planteamiento al mostrar que la integración de Lean manufacturing con tecnologías de Industria 4.0 es clave para mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la capacidad de adaptación en entornos complejos (Jamari y Fedouaki, 2025). Por su parte, Rahardjo et al. (2023) subrayan que esta combinación no solo optimiza procesos, sino que también reduce emisiones y maximiza el uso eficiente de los recursos. Se sostiene que Lean actúa como habilitador de la digitalización, y que la transformación digital, a su vez, potencia la efectividad de herramientas Lean como JIT y TPM, recomendando implementaciones progresivas y alineadas con la estrategia organizacional. Costa et al. (2024) plantean un modelo integral que une Lean e I4.0 con métricas de triple impacto, destacando la importancia de la alineación cultural y el liderazgo. En la misma línea, Frank et al. (2025) aportan evidencia empírica de que la co-implementación de Lean e I4.0 produce efectos sinérgicos en productividad, calidad y flexibilidad. Por su parte, Suprayitno (2024) enfatiza que Lean debe concebirse como una estrategia de gestión integral que conecta la eliminación de desperdicios con métricas de desempeño y compromiso organizacional, mientras que Suroso y Santosa (2024) confirman que las prácticas Lean tienen un impacto positivo y significativo en el desempeño operativo, efecto que se ve maximizado por la alineación estratégica y el compromiso de la alta dirección.

La evidencia internacional confirma que metodologías de mejora continua como Lean y Six Sigma poseen un alto grado de transferibilidad entre industrias, siempre que se adapten a las particularidades organizacionales y se acompañen de liderazgo, cultura de innovación y desarrollo de capacidades (Olufemi, 2024; Singh et al., 2025; Syamil et al., 2023). En este sentido, Lean se consolida como un sistema socio-técnico adaptable, y una plataforma estratégica para la transformación digital, integrando mejoras operativas, capacidades tecnológicas, sostenibilidad ambiental y gestión del capital humano bajo un marco sistémico y contextualizado.

Este estudio tuvo como objetivo analizar, mediante un enfoque comparativo, si la adopción de técnicas Lean en plantas manufactureras multinacionales en México presenta diferencias significativas entre sectores industriales. A partir de la evidencia estadística, se busca descartar al sector industrial como factor determinante y plantear, con base en el marco teórico de las capacidades dinámicas, que dichas variaciones podrían estar más asociadas a capacidades organizacionales internas. La medición del grado y tipo de adopción (integral o parcial) se realizó utilizando el modelo integral de la Casa del STP como referencia metodológica.

En este contexto, surge la necesidad de determinar si las diferencias en la adopción Lean se explican por el sector industrial o por factores organizacionales internos, cuestión que constituye el problema central de esta investigación. Con base en la literatura revisada y en el marco teórico de las capacidades dinámicas, se plantea la siguiente hipótesis: H1: No existen diferencias estadísticamente significativas en el tipo de adopción Lean (parcial o integral) entre plantas manufactureras multinacionales de los sectores automotriz, aeroespacial, eléctrico/electrónico y médico en México.

En consecuencia, este estudio tiene como objetivo principal determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el tipo de adopción Lean (parcial o integral) entre plantas manufactureras multinacionales pertenecientes a los sectores automotriz, aeroespacial,

eléctrico/electrónico y médico en México, utilizando el modelo integral de la Casa del Sistema de Producción Toyota. Como objetivo secundario, se busca explorar en qué medida los factores organizacionales internos, más que el sector industrial, pueden explicar las variaciones en la adopción.

Los hallazgos de esta investigación pueden beneficiar a gerentes de operaciones y responsables de mejora continua en empresas multinacionales, al proporcionar evidencia para diseñar estrategias de implementación Lean más efectivas y sostenibles. Asimismo, académicos e investigadores podrán emplear estos resultados para ampliar el cuerpo de conocimiento sobre la adopción de Lean en contextos latinoamericanos, y responsables de política industrial podrán considerar esta información para orientar programas de competitividad y modernización productiva.

2. Materiales y métodos

Población y muestra

La población objetivo del estudio estuvo conformada por plantas de manufactura de compañías multinacionales (PMM) ubicadas en México, pertenecientes a cuatro sectores industriales estratégicos: automotriz, aeroespacial, eléctrico/electrónico y médico. Estas plantas desempeñan un papel clave en el desarrollo económico del país y son representativas de la adopción de prácticas de mejora continua en el entorno manufacturero.

La muestra final estuvo compuesta por 316 plantas, las cuales completaron de manera válida el cuestionario. El muestreo fue no probabilístico e intencional, orientado a seleccionar plantas con experiencia reconocida en la implementación de técnicas Lean, de modo que los datos recogidos reflejaran el estado real del fenómeno bajo análisis.

Sujetos participantes

Los sujetos participantes fueron gerentes e ingenieros de planta con experiencia directa en la implementación de prácticas de manufactura esbelta. Este perfil fue seleccionado por su conocimiento técnico y su capacidad para evaluar el grado de adopción de las técnicas Lean al interior de sus organizaciones. La identificación de estos participantes se realizó mediante la herramienta profesional LinkedIn Recruiter, enfocada en profesionales del sector manufacturero.

Variables del estudio

En concordancia con la hipótesis H1 y los objetivos planteados, se definieron las siguientes variables. La variable central del estudio es la adopción de técnicas Lean, medida en función de dos dimensiones clave: el grado de implementación y el tipo de adopción (parcial o integral). Esta medición se basa en el modelo conceptual de la Casa del Sistema de Producción Toyota (SPT) que agrupa las principales técnicas asociadas a esta filosofía.

En la Tabla 1. se resume cómo fueron operacionalizadas estas variables en el estudio.

Tabla 1. Operacionalización de variables
Table 1. Operationalization of variables

Variable	Dimensión	Indicador(es)	Ítem del instrumento	Escala de medición
Adopción de técnicas Lean	Grado de implementación	Porcentaje de implementación de cada técnica Lean (13 en total)	“¿Qué porcentaje de la planta ha implementado [nombre de la técnica]?”	Escala de Likert ordinal (1 a 5): 1 = 0 %, 2 = 1–25 %, 3 = 26–50 %, 4 = 51–75 %, 5 = más del 75 %
Adopción de técnicas Lean	Tipo de adopción	Clasificación como adopción integral o parcial	Determinada a partir de la combinación de respuestas: - Integral = todas ≥ 1 - Parcial = al menos una en 0 %	Variable dicotómica: 0 = Parcial 1 = Integral
Sector industrial	N/A	Tipo de industria a la que pertenece la planta	“¿A qué sector industrial pertenece su planta?”	Variable categórica nominal: Automotriz, Eléctrico/Electrónico, Aeroespacial, Médico

Referencia: Elaboración propia

Instrumento de medición

Se diseñó un cuestionario estructurado en línea con base en el modelo conceptual de la Casa del Sistema de Producción Toyota (SPT), que integra elementos filosóficos, técnicos y operativos de la manufactura esbelta (Hernández y Vizán, 2013; Lean Certification Alliance, 2021). El cuestionario

incluyó 13 ítems, cada uno correspondiente a una técnica Lean ampliamente documentada en la literatura por su impacto en el desempeño operativo (Negrão et al., 2016).

El cuestionario incluyó ítems diseñados para medir el grado de adopción de prácticas Lean según el modelo integral de la Casa del TPS. Las respuestas se recopilaban mediante una escala de Likert ordinal de 5 puntos, siguiendo la práctica predominante en estudios empíricos sobre adopción Lean y mejora continua, y con base en el estudio de Monge et al. (2013) realizado en plantas manufactureras en México. En esta escala, cada punto correspondió a un rango porcentual de implementación: 1 = 0 %, 2 = 1–25 %, 3 = 26–50 %, 4 = 51–75 % y 5 = más del 75 %. Esta codificación ha sido utilizada previamente en diversas investigaciones sobre adopción Lean en la industria manufacturera en México (Chávez-Pineda, 2021a; Chávez-Pineda, 2021b; Chávez-Pineda, 2022; Chávez-Pineda et al., 2023), lo que permite la comparación directa de resultados y fortalece la validez externa del estudio. Además, la escala de 5 puntos reduce la carga cognitiva y la ambigüedad de las opciones intermedias, favoreciendo respuestas más precisas tanto del personal operativo como del gerencial.

Esta medición permitió clasificar, tanto el grado de implementación de cada técnica como el tipo de adopción Lean: parcial (si al menos una técnica tenía 0 % de implementación) o integral (si todas las técnicas contaban con al menos algún grado de implementación).

Validación del instrumento

El cuestionario se basó en una escala previamente validada y utilizada en investigaciones anteriores en contextos industriales y geográficos similares (Monge et al., 2013; Chávez-Pineda, 2021a; 2021b; 2022; Chávez-Pineda et al., 2023). Fue validado por expertos en manufactura esbelta y posteriormente sometido a una prueba piloto con participantes pertenecientes al mismo perfil de la población objetivo. No se identificaron problemas de comprensión, ambigüedad o relevancia en los ítems, por lo que no fue necesario agregar, eliminar o modificar preguntas. La confiabilidad del instrumento se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, que arrojó un valor de 0.906, lo cual indica una alta consistencia interna. Estos resultados confirmaron la adecuación del instrumento para medir el grado de adopción de prácticas Lean en plantas manufactureras multinacionales en México.

Recolección de datos

La recolección de datos se realizó a través de una plataforma de encuestas en línea, con el cuestionario disponible durante un periodo determinado para su aplicación. El contacto con los participantes se efectuó mediante LinkedIn Recruiter, seleccionando perfiles profesionales con experiencia comprobable en sistemas de producción esbelta. La participación fue voluntaria y se garantizó la confidencialidad y anonimato de los datos.

En la fase inicial de contacto se alcanzó a 512 profesionales del sector manufacturero pertenecientes a distintas plantas multinacionales en México. De este total, 316 aceptaron participar voluntariamente y cumplieron con los criterios de inclusión establecidos para el estudio, por lo que únicamente a este grupo se les envió el enlace para responder el cuestionario en línea. A estos participantes se les dio seguimiento posterior para recordarles y motivarles a completar la encuesta. No se registraron cuestionarios eliminados en esta etapa, dado que el instrumento se aplicó exclusivamente a quienes

confirmaron su disposición y elegibilidad para participar. La tasa de respuesta efectiva fue del **61.7 %**, valor que se considera alto en estudios organizacionales y superior al promedio reportado en investigaciones similares en contextos industriales (Baruch y Holtom, 2008).

Análisis de datos

Para analizar si el enfoque de adopción Lean (parcial o integral) difiere entre sectores industriales, se clasificó la muestra según el tipo de adopción reportado. El procesamiento de los datos se realizó utilizando el software SPSS versión 22. En primer lugar, se aplicó un análisis descriptivo para identificar las técnicas con mayor y menor nivel de implementación en las PMM encuestadas.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis comparativo entre sectores industriales, aplicando la prueba chi-cuadrado de Pearson con un nivel de significancia de 95 %, es decir, $\alpha = 0.05$, a fin de evaluar la existencia de diferencias significativas en el tipo de adopción (parcial o integral) de las técnicas Lean entre los distintos sectores. Para contrastar la hipótesis de investigación (H1), se aplicó la prueba de chi-cuadrado de Pearson con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0.05$). La variable dependiente fue el tipo de adopción Lean (parcial o integral) y la variable independiente fue el sector industrial.

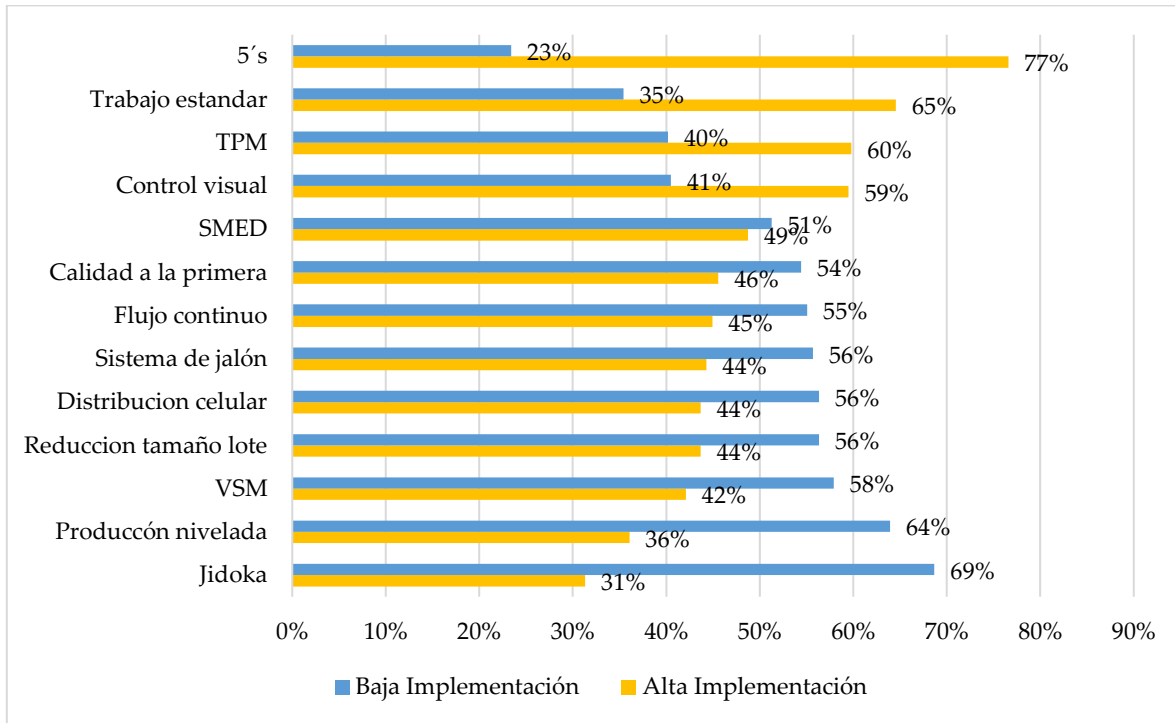
Adicionalmente, dado que los datos fueron recolectados mediante auto-reporte en un único momento temporal, se evaluó la posible presencia de sesgo del método común (*common method bias*) aplicando la prueba de un solo factor de Harman. Para ello, se realizó un análisis factorial exploratorio sin rotación utilizando el método de componentes principales. En esta etapa, el objetivo principal fue evaluar la unidimensionalidad del constructo y confirmar la coherencia interna de los ítems, más que identificar factores latentes independientes entre sí. De acuerdo con Hair et al. (2019), la rotación —ya sea ortogonal u oblicua— resulta más apropiada cuando se busca maximizar la interpretabilidad de los factores y existe evidencia de multidimensionalidad. En este estudio, las dimensiones de análisis se definieron previamente con base en el modelo teórico adoptado, por lo que se optó por mantener las cargas factoriales iniciales sin aplicar rotación, evitando redistribuciones que pudieran alejarse del marco conceptual planteado.

3. Resultados y discusión

La prueba de Harman mostró que el primer factor explicó el 49.82 % de la varianza total. Este valor, aunque cercano al umbral de referencia del 50 %, no lo supera, por lo que no se considera que exista evidencia concluyente de un sesgo dominante en los datos. No obstante, se reconoce como una posible limitación del diseño del estudio. De acuerdo con Podsakoff et al. (2003), valores superiores al 50 % pueden sugerir la influencia del método de medición en los resultados, por lo que se recomienda que investigaciones futuras complementen los datos perceptuales con múltiples fuentes o mediciones en diferentes momentos para mitigar esta posible fuente de varianza espuria.

Los resultados muestran que las técnicas más ampliamente implementadas fueron 5S (77 %), trabajo estandarizado (65 %), Mantenimiento Productivo Total —TPM— (60 %) y control visual (59 %). En contraste, prácticas como producción nivelada (36 %), *Jidoka* (31 %), flujo continuo (45 %), sistema de

jalón (44 %) y distribución celular (44 %) presentaron niveles de adopción significativamente menores (Fig. 1).



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Clasificación por herramienta Lean en alta y baja implementación.
Figure 1. The Lean tool is used to classify implementation as either high or low.

Aunque las técnicas con mayor grado de implementación no coinciden con lo reportado en otros estudios, con excepción de las 5S, los resultados son similares en las técnicas con menor grado de adopción, las cuales están relacionadas con el pilar de Justo a Tiempo —JIT—, como SMED, flujo continuo, sistema de jalón y distribución celular (Taj y Morosan, 2011; Prabhushankar et al., 2015; Setianto y Haddud, 2016; Chavez, 2021a). Estos hallazgos evidencian una mayor adopción de técnicas asociadas a la estabilidad operativa, mientras que las técnicas vinculadas a los pilares del TPS, especialmente JIT y *Jidoka*, muestran una adopción limitada. Esta tendencia coincide con investigaciones previas que reportan una implementación parcial y fragmentada del modelo Lean en la industria manufacturera mexicana (Chávez-Pineda, 2021b; Chávez-Pineda, 2022) y refuerza la interpretación de Lean como una “caja de herramientas” (Lander y Liker, 2007) más que como un sistema integral de gestión.

La preferencia por técnicas operativas de fácil aplicación, como 5S o TPM, y la baja implementación de técnicas más estructurales, como la nivelación o *Jidoka*, confirman lo señalado por Lander y Liker (2007) y Ohno (1988): el fracaso en adoptar Lean como sistema integral limita su efectividad y sostenibilidad. Este patrón de adopción refleja una priorización de prácticas de rápida implementación y bajo costo, lo que, si bien facilita resultados iniciales, puede reducir el potencial de mejora a largo plazo.

De las 316 plantas evaluadas, el 52.8 % presenta una adopción parcial, mientras que el 47.2 % refleja una adopción integral. Al segmentar los datos por sector, se observa que las industrias automotriz y eléctrica/electrónica registran porcentajes similares de adopción integral (51.6 % y 52.2 %, respectivamente), mientras que en el ámbito médico (34.9 %) y el aeroespacial (36.7 %) predomina la adopción parcial (Tabla 1).

Tabla 1. Adopción integral y parcial de las técnicas Lean de las PMM de los diferentes sectores bajo estudio
Table 1. Full and partial adoption of Lean PMM techniques in the different sectors under study

		Sector				
		Eléctrico/ electrónico	Automotriz	Aeroespacial	Médica	Total
Enfoque	Parcial	32 (47.8 %)	76 (48.4 %)	31 (63.3 %)	28 (65.1 %)	167 (52.8 %)
	Integral	35 (52.2 %)	81 (51.6 %)	18 (36.7 %)	15 (34.9 %)	149 (47.2 %)
	Total	67 (100 %)	157 (100 %)	49 (100 %)	43 (100 %)	316 (100 %)

Nota: Los valores sin paréntesis son las frecuencias observadas y entre paréntesis los porcentajes correspondientes.

La prueba chi-cuadrado ($\chi^2 = 6.669$; $p = 0.083$) no mostró diferencias estadísticamente significativas en el tipo de adopción Lean entre los sectores industriales evaluados, por lo que no se rechazó la hipótesis nula. Este resultado indica que la pertenencia a un sector específico no explica por sí sola las variaciones en la adopción Lean. En consecuencia, y en concordancia con evidencia empírica previa (Belekoukias et al., 2014; Hernández-Matías et al., 2020; Hardcopf et al., 2021; Liu et al., 2024), se infiere que dichas variaciones se relacionan principalmente con factores organizacionales internos, como el liderazgo, la cultura de mejora continua y la comprensión del modelo TPS, los cuales han demostrado tener un papel más determinante que las características estructurales del sector.

Desde una perspectiva teórica, el hallazgo de que no existen diferencias significativas por sector refuerza la idea de que la adopción efectiva de Lean depende menos del tipo de industria y más de cómo se comprende e interioriza el Sistema de Producción Toyota (TPS) dentro de cada organización. Esta interpretación complementa estudios previos que ya advertían sobre la superficialidad en la implementación Lean en plantas latinoamericanas (Chávez-Pineda, 2021b) y sugiere que el reto principal no es la transferencia sectorial de las prácticas, sino su internalización cultural y estratégica.

Los resultados obtenidos en este estudio, que indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre sectores industriales en cuanto al enfoque de adopción Lean, son consistentes con hallazgos previos en la literatura. Investigaciones empíricas han demostrado que Lean Manufacturing puede implementarse en prácticamente cualquier tipo de industria, sin que el producto final represente una restricción significativa (Abolhassani et al., 2016; Dave y Sohani, 2019). Asimismo, estudios como los de Lucato et al. (2014) y Salhieh y Abdallah (2019) no encontraron

asociación entre el tipo de industria y la implementación de Lean, lo cual refuerza la hipótesis de que factores internos, como la cultura organizacional o el entendimiento filosófico del TPS, tienen mayor peso que el contexto sectorial en el éxito de su adopción.

Estos resultados, que muestran una adopción parcial de prácticas Lean y la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre sectores industriales, coinciden con una amplia evidencia internacional que señala que la efectividad de Lean está más vinculada a factores internos que al contexto sectorial. Investigaciones como las de Kuo y Chen (2021) en el sector marítimo y Gutiérrez et al. (2022) en entornos manufactureros destacan que el éxito de Lean depende del equilibrio entre la implementación de soluciones técnicas y la consolidación de una base social que fomente la cooperación, el aprendizaje y la innovación. Las limitaciones observadas en empresas con adopción parcial podrían deberse a un desequilibrio entre ambas dimensiones, reduciendo así el potencial de Lean para generar valor integral.

La adopción parcial de Lean puede explicarse, además, por la presencia de barreras organizacionales críticas. Ferrazzi et al. (2021) identificaron, mediante el método fuzzy DEMATEL, que la resistencia al cambio, la falta de competencias, el escaso compromiso de la alta dirección y la ausencia de una visión estratégica a largo plazo actúan de forma interdependiente, generando efectos en cadena que limitan la consolidación de una cultura Lean. Esto sugiere que cualquier estrategia de mejora debe priorizar la eliminación de estas barreras causales antes de atender problemas secundarios, con el fin de viabilizar una implementación integral.

Diversos estudios han demostrado que la integración estratégica de Lean con herramientas de la Industria 4.0 puede potenciar sus beneficios y contribuir a un desempeño sostenible. Ooi et al. (2023) evidencian que la adopción de tecnologías como Internet de las cosas (IoT), analítica de datos y la automatización de operaciones ejerce un efecto moderador positivo sobre el vínculo entre Lean y el desempeño económico, social y ambiental, especialmente en prácticas como el flujo continuo, la reducción de tiempos de preparación (SMED), el mantenimiento productivo total (TPM) y el desarrollo de proveedores. De forma complementaria, Rossini et al. (2019) encontraron que la integración Lean-Industria 4.0 está condicionada por la madurez previa en prácticas Lean y la capacidad de gestionar el cambio, más que por las características del sector. Sony et al. (2021) refuerzan esta perspectiva al concluir que el éxito de transformaciones digitales depende del compromiso del liderazgo, la cultura organizacional y las competencias del personal.

Asimismo, la evidencia sobre metodologías afines como Lean Six Sigma muestra patrones similares. Singh et al. (2025) demostraron que la variación en resultados se explica más por la alineación estratégica, el liderazgo y la capacitación continua que por el tipo de industria. En la misma línea, Syamil et al. (2023) evidencian que los beneficios de Six Sigma se replican en industrias diversas siempre que existan condiciones internas favorables como liderazgo comprometido, cultura de mejora continua y competencias técnicas adecuadas. De forma complementaria, Ar (2025) y Csíki et al. (2023) subrayan que el desarrollo de capacidades dinámicas —en especial las capacidades de procesos— tiene un efecto positivo y sostenido en el desempeño empresarial, mientras que las capacidades rutinarias o puramente operativas pueden presentar un impacto limitado o incluso negativo a nivel estratégico.

En conjunto, esta evidencia refuerza la interpretación de que la ventaja competitiva no proviene de la adopción aislada de herramientas Lean o tecnologías avanzadas, sino de su integración coherente y adaptada a las capacidades organizacionales internas. Para el contexto mexicano, esto implica que

las organizaciones deben ir más allá de la simple implementación de prácticas, priorizando la gestión del cambio, la eliminación de barreras estructurales, el fortalecimiento de capacidades dinámicas y la integración estratégica con tecnologías digitales, con el fin de maximizar los beneficios de Lean y asegurar mejoras sostenibles en eficiencia, competitividad y resiliencia.

4. Conclusiones

Este estudio tuvo como objetivo determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en el tipo de adopción Lean (parcial o integral) entre plantas manufactureras multinacionales de distintos sectores en México, encontrando que no se identificaron diferencias significativas por sector. Este resultado confirma que factores organizacionales internos, como el liderazgo, la cultura de mejora continua y la comprensión del modelo TPS, influyen más en la adopción Lean que las características estructurales del sector industrial. Asimismo, se evidenció una tendencia hacia la implementación parcial, centrada en técnicas de fácil aplicación, lo que limita el potencial de mejora integral a largo plazo. Estos hallazgos pueden guiar a líderes de operaciones y responsables de mejora continua para diseñar estrategias de implementación Lean más efectivas y sostenibles.

Contribuciones teóricas

En el plano teórico, este estudio confirma empíricamente que, en el contexto mexicano, la adopción Lean no depende del sector industrial, sino de factores organizacionales internos como el liderazgo, la cultura de mejora continua y la comprensión del modelo TPS, ampliando la evidencia disponible en entornos latinoamericanos. Asimismo, aporta al debate sobre la implementación fragmentada de Lean, evidenciando que las técnicas más aplicadas corresponden a estabilidad operativa (5S, TPM) y que pilares centrales como JIT y *Jidoka* presentan baja adopción, consolidando la interpretación de Lean como “caja de herramientas” más que sistema integral. Adicionalmente, valida el uso del modelo integral de la Casa del SPT como marco metodológico para evaluar el grado y tipo de adopción Lean en análisis comparativos, e integra la teoría de capacidades dinámicas para explicar la relación entre prácticas Lean, adaptabilidad y resiliencia organizacional.

Contribuciones Prácticas

En el plano práctico, los hallazgos orientan a líderes de operaciones y responsables de mejora continua a diseñar estrategias de implementación Lean más efectivas, priorizando el fortalecimiento de capacidades internas sobre las características del sector. El diagnóstico de patrones de adopción obtenido permite a las empresas reconocer las limitaciones de aplicar técnicas aisladas y planificar intervenciones para avanzar hacia una adopción integral. El instrumento validado utilizado en este estudio puede ser replicado por otras organizaciones para evaluar su nivel de implementación y compararse con referentes sectoriales. Finalmente, los resultados ofrecen evidencia útil para los responsables de política industrial y programas de competitividad, al enfatizar la necesidad de promover capacidades organizacionales que sustenten una implementación integral y sostenible de Lean en México y Latinoamérica.

Conflicto de interés

El autor del presente artículo expresa que no existe ningún conflicto de interés en la elaboración y publicación del presente estudio.

5. Referencias

- Abdallah, A. B., Dahiyat, S. E., & Matsui, Y. (2019). Lean management and innovation performance: Evidence from international manufacturing companies. *Management Research Review*, 42(2), 239-262. <https://doi.org/10.1108/mrr-10-2017-0363>
- Ar, A. Y. (2025). Leaning towards resilience: mapping and exploring the literature on lean management. *Production & Manufacturing Research*, 13(1), 2512753. <https://doi.org/10.1080/21693277.2025.2512753>
- Baker, B. (2016). Why a Lean Transformation is Like Competing in the Olympics. *Industry Week. Insights, news and information for manufacturing leaders*. <https://n9.cl/26zxd>
- Baruch, Y., & Holtom, B. C. (2008). Survey response rate levels and trends in organizational research. *Human Relations*, 61(8), 1139–1160. <https://doi.org/10.1177/0018726708094863>
- Belhadi, A., Touriki, F. E., & Fezazi, S. E. (2017). Prioritizing the solutions of lean implementation in SMEs to overcome its barriers: An integrated fuzzy AHP-TOPSIS approach. *Journal Of Manufacturing Technology Management*, 28(8), 1115-1139. <https://doi.org/10.1108/jmtm-04-2017-0066>
- Belekoukias, I., Garza-Reyes, J. A., & Kumar, V. (2014). The impact of lean methods and tools on the operational performance of manufacturing organisations. *International Journal of Production Research*, 52(18), 5346–5366. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.903348>
- Bicheno, J., & Holweg, M. (2009). The Lean Toolbox: The Essential Guide to Lean Transformation. Production and Inventory Control. 290 pp. *Systems and Industrial Engineering (PICSIE)*. <https://es.scribd.com/document/228944438/2733>
- Chávez-Pineda, J. (2021a). Grado de implementación de las prácticas del sistema técnico de administración esbelta en la industria maquiladora de manufactura de México. *RECAI Revista de Estudios en Contaduría, Administración e Informática*, 10(28), 41- 68. <https://doi.org/10.36677/recai.v10i28.15295>
- Chávez Pineda, J. (2021b). Adopción parcial e integral de las prácticas del sistema técnico de Lean en la industria maquiladora de manufactura en México. *RECAI Revista De Estudios En Contaduría, Administración e Informática*, 11(30), 28-50. <https://doi.org/10.36677/recai.v11i30.16919>
- Chávez-Pineda J. (2022). Adopción parcial e integral de la filosofía lean en la industria de manufactura eléctrica y electrónica en México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 16(3): e1048. <https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.1048>

- Chávez Pineda, J. A., García Ramírez, S., Vallejo Navarrete, G. V., & Ceja Silva, E. G. (2023). Grado de madurez en programas de mejora Lean en compañías multinacionales de manufactura automotriz en México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 17(3), e1286. <https://doi.org/10.54167/tch.v17i3.1286>
- Costa, F., Alemsan, N., Bilancia, A., Tortorella, G. L., & Portioli Staudacher, A. (2024). Integrating Industry 4.0 and Lean Manufacturing for a sustainable green transition: A comprehensive model. *Journal of Cleaner Production*, 451, 142728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142728>
- Fortuny-Santos, J., Ruiz-de-Arbulo-López, P., Zubeltzu-Jaka, E., & Lujan-Blanco, I. (2025). Lean manufacturing and environmental performance: A meta-analytic approach. *International Journal of Lean Six Sigma*, 16 (4), 848–889. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2023-0190>
- Gutierrez, L., Lameijer, B. A., Anand, G., Antony, J., & Vijaya Sunder, M. (2022). Beyond efficiency: The role of lean practices and cultures in developing dynamic capabilities microfoundations. *International Journal of Operations & Production Management*, 42(13), 506–536. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2022-0086>
- Csíki, O., Demeter, K., & Losonci, D. (2023). How to improve firm performance? – The role of production capabilities and routines. *International Journal of Operations & Production Management*, 43(13), 1–26. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2022-0221>
- Hardcopf, R., Liu, G. J., & Shah, R. (2021). Lean production and operational performance: The influence of organizational culture. *International Journal of Production Economics*, 235, 108060. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108060>
- Hernández-Matías, J. C., & Vizán Idoipe, A. (2013). Lean manufacturing: conceptos, técnicas e implantación. 178 pp. Escuela de Organización Industrial. https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/EOI_LeanManufacturing_2013.pdf
- Hernandez-Matias, J., Ocampo, J. R., Hidalgo, A., & Vizan, A. (2020). Lean manufacturing and operational performance: Interrelationships between human-related lean practices. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(2), 217–235. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2019-0140>
- Jamari, S., & Fedouaki, F. (2025). Industry 4.0 enablers and lean manufacturing tools in respect of human resources. *Engineering Proceedings*, 97(1), 43. <https://doi.org/10.3390/engproc2025097043>
- Japan Management Association. (2018). *Kanban just-in time at Toyota: Management begins at the workplace*. 212 pp. Routledge.
- Jasti, N. V. K., & Kodali, R. (2014). A literature review of empirical research methodology in lean manufacturing. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(8), 1080-1122. <https://doi.org/10.1108/ijopm-04-2012-0169>
- Kong, R. W. M., Kong, T. H. T., & Huang, T. (2024). Lean methodology for garment modernization. *International Journal of Engineering Development and Research*, 12(3), 1–13. <https://arxiv.org/abs/2410.07705>

- Komkowski, T., Sony, M., Antony, J., Lizarelli, F. L., Garza-Reyes, J. A., & Tortorella, G. L. (2024). Operational practices for integrating lean and industry 4.0 – A dynamic capabilities perspective. *International Journal of Production Research*, 63(4), 1517-1537. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2381127>
- Komkowski, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G. L., & Pongboonchai-Empl, T. (2023). Integrating Lean Management with Industry 4.0: An explorative Dynamic Capabilities theory perspective. *Production Planning & Control*, 36(5), 607–625. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2294297>
- Kuo, S.-Y., & Chen, L.-B. (2021). Applying sociotechnical systems theory to examine the values of lean practices in the context of container shipping. *IEEE Access*, 9, 146921-146937. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3123448>
- Lander, E., & Liker, J. K. (2007). The Toyota Production System and art: making highly customized and creative products the Toyota way. *International Journal of Production Research*, 45(16), 3681-3698. <https://doi.org/10.1080/00207540701223519>
- Liker, J.K (2004). *The Toyota Way*. 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. 352 pp. Mc Graw-Hill, New York. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071392310?implicit-login=true>
- Lean Certification Alliance. (s. f.). SME. <https://www.sme.org/training/lean-certification/about-the-lean-certification-alliance/>
- Liker, J. K., & Morgan, J. M. (2006). The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development. *Academy of Management Perspectives*, 20(2), 5-20. <https://doi.org/10.5465/amp.2006.20591002>
- Liu, C., Wang, M., Niu, Z., & Mo, X. (2024). Moderating effect of dynamic capabilities on the relationship between lean practices and operational performance. *International Journal of Lean Six Sigma*, 15(7), 1343-1364. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-02-2022-0034>
- Maware, C., & Adetunji, O. (2019). Lean manufacturing implementation in Zimbabwean industries: Impact on operational performance. *International Journal of Engineering Business Management*, 11, 1–12. <https://doi.org/10.1177/1847979019859790>
- Monge, C., Cruz, J., & López, F. (2013). Impacto de la Manufactura Esbelta, Manufactura Sustentable y Mejora Continua en la Eficiencia Operacional y Responsabilidad Ambiental en México. *Información Tecnológica*, 24(4), 15-32. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642013000400003>
- Negrão, L. L. L., Godinho Filho, M., & Marodin, G (2016). Lean practices and their effect on performance: a literature review. *Production Planning & Control*, 28(1), 33-56. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1231853>
- Netland, T. H., & Ferdows, K. (2016). The S-curve effect of lean implementation. *Production and Operations Management*, 25(6), 1106-1120. <https://doi.org/10.1111/poms.12539>

- Ohno, T. (1988). *The Toyota production system: Beyond large scale production*. Productivity press. Portland OR. <https://www.almendron.com/tribuna/wp-content/uploads/2021/12/toyota-production-system-beyond-large-scale-production.pdf>
- Olufemi, T. (2024). Lean manufacturing practices and organizational performance: A literature review. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 9(9), 611–619. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24SEP443>
- Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J. Y., & Podsakoff, N. P. (2003). Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*, 88(5), 879–903. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.88.5.879>
- Prabhushankar, G., Kruthika, K., Pramanik, S., & Kadadevaramath, R. S. (2015). Lean manufacturing system implementation in Indian automotive components manufacturing sector - an empirical study. *International Journal of Business and Systems Research*, 9(2), 179. <https://doi.org/10.1504/ijbsr.2015.069442>
- Rahardjo, B., Wang, F.-K., Yeh, R.-H., & Chen, Y.-P. (2023). Lean manufacturing in Industry 4.0: A smart and sustainable manufacturing system. *Machines*, 11(1), 72. <https://doi.org/10.3390/machines11010072>
- Rossini, M., Costa, F., Portioli-Staudacher, A., & Tortorella, G. (2019). The interrelation between Industry 4.0 and lean production: An empirical study on European manufacturers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 3963–3976. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03441-7>
- Setianto, P., & Haddud, A. (2016). A maturity assessment of lean development practices in manufacturing industry. *International Journal of Advanced Operations Management*, 8(4), 294. <https://doi.org/10.1504/ijaom.2016.084150>
- Shah, R., & Ward, P. T. (2003). Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management*, 21(2), 129–149. [https://doi.org/10.1016/s0272-6963\(02\)00108-0](https://doi.org/10.1016/s0272-6963(02)00108-0)
- Singh, T., Smith, A., Oladele, S., & Coadic, K. (2025). Cross-industry comparison of Lean Six Sigma applications: Insights for engineering project management. https://www.researchgate.net/publication/387832626_Cross-Industry_Comparison_of_Lean_Six_Sigma_Applications_Insights_for_Engineering_Project_Management
- Sony, M. (2018). Industry 4.0 and lean management: A proposed integration model and research propositions. *Production & Manufacturing Research*, 6(1), 416–432. <https://doi.org/10.1080/21693277.2018.1540949>
- Suroso, E., & Santosa, A. D. (2024). Effects of lean manufacturing practices on operational performance. *Journal of Research in Social Science and Humanities*, 4(1), 174–179. <https://doi.org/10.47679/jrssh.v4i1.121>

- Suprayitno, D. (2024). The role of lean manufacturing in enhancing operational efficiency and waste reduction. *Management Studies and Business Journal (Productivity)*, 1(11), 1470–1482. <https://ppipbr.com/index.php/productivity/article/view/422>
- Syamil, A., Ichsan, M., Syahrazly, M., Fadjar, M. P., & Revidia, I. R. (2023). Enhancing quality across industries: A systematic literature review on the impact of six sigma. *Global Business & Finance Review*, 28(7), 59–74. <https://doi.org/10.17549/gbfr.2023.28.7.59>
- Taj, S., & Morosan, C. (2011). The impact of lean operations on the Chinese manufacturing performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 22(2), 223-240. <https://doi.org/10.1108/17410381111102234>
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Patrones de consumo y predicción con redes neuronales en comercio electrónico para un producto insignia: caso del Reino Unido

Consumption patterns and prediction with neural networks in e-commerce from a star product: case of United Kingdom

Areli Abigail Domínguez-Barreto¹, Oscar Domínguez-Barreto^{1*}, Héctor Daniel Molina-Ruiz¹

¹ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Av. del Maestro, 41, Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo.

*Correspondencia: studentuach@gmail.com (Oscar Domínguez-Barreto)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1988>

Recibido: 21 de junio de 2025; Aceptado: 23 de septiembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Vladimir Villarreal-Contreras

Resumen

El comercio electrónico ha transformado la relación entre empresas y consumidores, generando grandes volúmenes de datos que requieren herramientas avanzadas para su análisis. Las Redes Neuronales Artificiales (ANN) son útiles para predecir tendencias y patrones de consumo en mercados dinámicos. El estudio se centra en el Reino Unido, líder europeo en comercio electrónico, para analizar el comportamiento del consumidor y el producto insignia más vendido: *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet*. El objetivo fue predecir el precio del *Popcorn Holder* en el Reino Unido mediante una red neuronal artificial, identificando patrones de consumo y proporcionando información útil para la toma de decisiones en comercio electrónico. Se analizaron 536,350 registros de ventas globales, filtrando 1,352 datos correspondientes al producto y país seleccionados. Se realizó limpieza y análisis exploratorio de datos usando Python en Google Colab®, empleando librerías como *pandas*, *numpy* y *tensorflow*. Se construyó y entrenó una red neuronal secuencial con optimizador Adam, función de pérdida *mean squared error* y 3,000 épocas. Se evaluó la pérdida durante el entrenamiento y se compararon las predicciones con precios reales. El Reino Unido fue el mayor consumidor del producto, que también resultó el más vendido a nivel global. La ANN generó una ecuación lineal que capturó la tendencia general a la baja de los precios, aunque con fluctuaciones a corto plazo. La pérdida disminuyó rápidamente al inicio del entrenamiento y se estabilizó, indicando convergencia del modelo. El cliente número 14646 destacó por el mayor volumen de compras, dato relevante para estrategias de fidelización. Las redes neuronales demostraron ser herramientas efectivas para predecir precios en comercio electrónico y apoyar la gestión de inventarios y estrategias de mercado. Los resultados confirman la posición del Reino Unido como líder europeo en este sector y resaltan

la utilidad del análisis basado en ANN para identificar patrones de consumo y oportunidades de negocio.

Palabras clave: análisis de datos, comercio electrónico, pronóstico, redes neuronales.

Abstract

E-commerce has transformed the relationship between businesses and consumers, generating large volumes of data that require advanced tools for analysis. Artificial Neural Networks (ANNs) are valuable for predicting trends and consumption patterns in dynamic markets. This study focuses on the United Kingdom, Europe's e-commerce leader, to analyze consumer behavior and the best-selling flagship product: Popcorn Holder or Popcorn Bouquet. The objective was to predict the price of the Popcorn Holder in the United Kingdom using an artificial neural network, identifying consumption patterns and providing useful insights for decision-making in e-commerce. A total of 536,350 global sales records were analyzed, filtering 1,352 data points corresponding to the selected product and country. Data cleaning and exploratory analysis were performed using Python in Google Colab®, employing libraries such as *pandas*, *numpy*, and *tensorflow*. A sequential neural network was built and trained with the Adam optimizer, *mean squared error* loss function, and 3,000 epochs. The loss during training was evaluated, and predictions were compared with actual prices. The United Kingdom was identified as the largest consumer of the product, which was also the best-selling item globally. The ANN generated a linear equation that captured the overall downward trend in prices, despite short-term fluctuations. Loss decreased rapidly during the initial training phase and stabilized, indicating model convergence. Customer number 14646 stood out as the top buyer, a valuable insight for customer loyalty strategies. Artificial neural networks proved to be effective tools for predicting prices in e-commerce and supporting inventory management and market strategies. The results confirm the United Kingdom's position as Europe's e-commerce leader and highlight the usefulness of ANN-based analysis for identifying consumption patterns and business opportunities.

Keywords: data analysis, e-commerce, forecasting, neural networks.

1. Introducción

En la era digital, el comercio electrónico ha transformado radicalmente la manera en que los consumidores realizan compras, así como la relación de las empresas con sus clientes. Este entorno genera una cantidad masiva de datos, que abarca desde historiales de compras hasta patrones de navegación, lo que ha propiciado la adopción de tecnologías avanzadas destinadas a analizar y predecir el comportamiento del consumidor. En este contexto, las redes neuronales juegan un papel fundamental, en el análisis y predicción de dicho comportamiento.

El comercio electrónico es una parte importante de la economía de un país, es por esto que se requiere efectuar un análisis acerca de los productos insignia de un negocio (es decir, el más consumido dentro del país); de esta manera, se pueden conocer las necesidades del mercado, además de considerarse los diversos factores para cubrir la demanda de un producto dado y brindando la pauta para generar ideas de negocio. El comercio electrónico es un pilar fundamental de la economía del

Reino Unido, posicionando al país como líder europeo y uno de los mercados más avanzados a nivel mundial en ventas y adopción digital (Rokicki, 2018; Hood et al., 2020; Fedushko et al., 2021).

El Reino Unido ha experimentado un crecimiento sostenido en ventas online, con una infraestructura digital avanzada y una alta penetración de Internet (Rokicki, 2018; Fedushko et al., 2021). En este sentido, el comercio electrónico es estratégico tanto para grandes empresas como para Pymes, que lo consideran clave para la transformación y resiliencia empresarial (Drew, 2003; Fedushko et al., 2021).

El sector minorista, especialmente el de alimentación, ha invertido en canales online y entrega a domicilio, adaptándose a nuevas preferencias de los consumidores (Kirby-Hawkins et al., 2018; Hood et al., 2020). Reino Unido lidera en innovación de canales (entrega a domicilio, *click & collect*) y en la adopción de pagos digitales (Hood et al., 2020; Fedushko et al., 2021). Aunado a ello, el marco legal y regulatorio británico es avanzado y promueve la confianza y protección del consumidor en transacciones electrónicas (Jaradt, 2018; Lloyd, 2020).

Cabe hacer mención que, en el ecosistema del comercio electrónico, como indica González García (2020), Estados Unidos y China se encuentran como punteros en el comercio B2C (*Business to Consumer* – Negocio a Consumidor). El Reino Unido destaca como el mercado más importante de comercio electrónico en Europa y ocupa una posición privilegiada a nivel mundial, situándose como el tercero en importancia. Esto se debe en gran medida a la amplia conectividad de su población, ya que aproximadamente el 90 % de los adultos británicos tiene acceso a Internet. Siguiendo a Hall y Grogan (2017), el 86 % de los hogares británicos tiene acceso a Internet.

Siguiendo a Robayo-Botiva (2020), aunque es difícil predecir la intensidad e importancia del cambio que se va a producir en los próximos años en el comercio, algunos auguran una auténtica revolución. Lo que supone ya una realidad es el hecho de que cualquier empresa debe tener en cuenta: la comunicación y su relación con los consumidores; el reto que supone el Internet; el uso de dispositivos móviles; la combinación de Internet y el uso de dispositivos móviles; la web 2.0 y 3.0; y otros muchos elementos que surgen día a día y que configuran la sociedad digital. Lo anterior es para concretar sus ventas.

Además, una parte significativa de esta población utiliza servicios de banca digital de manera habitual, lo que refleja un alto nivel de adopción tecnológica. El cambio hacia la banca digital en Reino Unido ha sido tan marcado que una parte considerable de las sucursales físicas ha sido reemplazada por servicios de autoservicio y plataformas digitales (Grigorescu et al., 2023; Wu, 2024). Aunque la adopción es alta en la mayoría de los grupos demográficos, los jóvenes y adultos de mediana edad son los usuarios más activos, mientras que los mayores de 55 años muestran una adopción más lenta (Koya y Jones, 2021; Grigorescu et al., 2023). Por otro lado, el comercio electrónico es una práctica común para los habitantes, quienes recurren regularmente a estas plataformas para realizar sus compras, consolidando al Reino Unido como un referente global en este sector.

En el contexto del ecosistema del comercio electrónico, las redes neuronales pueden ser empleadas para predecir tendencias de compra. Esto suele basarse la búsqueda y encuentro de patrones de comportamiento; de esta manera se puede potenciar el mercado para generar oportunidades de crecimiento en el sector. La capacidad de las redes neuronales para ajustarse de manera autónoma a nuevas condiciones también es crucial en áreas como la predicción del clima o la gestión de sistemas

de energía, donde las variables pueden cambiar de forma dinámica. Por ejemplo, si aplicación se extiende en: medicina y salud, con el diagnóstico asistido por IA (inteligencia artificial), pronóstico de enfermedades, análisis de imágenes médicas y apoyo en tratamientos personalizados (Abiodun et al., 2018; Haglin et al., 2019); agricultura, con la predicción de rendimientos, detección de enfermedades y plagas, control inteligente de malezas, clasificación de calidad de cultivos y optimización de procesos agrícolas (Abiodun et al., 2018; Kujawa y Niedbała, 2021); energía por el modelado y predicción en sistemas solares, estimación de cargas térmicas, control de sistemas de energía y optimización de consumo (Kalogirou, 1999; Kalogirou, 2000; Abiodun et al., 2018); negocios y finanzas, a través de la predicción de quiebras, pronóstico de precios de acciones, sistemas de soporte a la decisión y clasificación de riesgos (Tkáč y Verner, 2016; Abiodun et al., 2018); visión por computadora y procesamiento de imágenes, con el reconocimiento de patrones, clasificación de objetos, análisis de imágenes satelitales y sistemas de vigilancia (Liu et al., 2017; Li et al., 2022; Xie et al., 2022); procesamiento de lenguaje natural, con la traducción automática, análisis de sentimientos, reconocimiento de voz y sistemas de recomendación (Liu et al., 2017; Li et al., 2022); redes sociales y biología molecular, en el análisis de grafos complejos, categorización de nodos y predicción de enlaces (Wu et al., 2019; Wu et al., 2022; Ponzi y Napoli, 2025). Por esta razón, se justifica el uso de redes neuronales en diversos campos del conocimiento.

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN) son un método para resolver problemas, de forma individual o combinadas con otros métodos, para aquellas tareas de clasificación, identificación, diagnóstico, optimización o predicción en las que el balance datos/conocimiento se inclina hacia los datos y donde, adicionalmente, puede haber la necesidad de aprendizaje en tiempo de ejecución y de cierta tolerancia a fallos (Salas, 2004). Las redes neuronales artificiales (ANN) son modelos matemáticos y computacionales inspirados en sistemas biológicos, adaptados y simulados en computadoras; han surgido como un intento de desarrollar modelos que emulen las características del cerebro humano (Menacho, 2014).

La factibilidad de uso de las redes artificiales neuronales y sus diferentes modelos ha aumentado su posibilidad de resolución, debido al avance tecnológico y el incremento de poder computacional disponible. Para los problemas de predicción, los modelos de redes neuronales son aplicados de forma similar a una variedad de modelos estadísticos, tales como los modelos de regresión lineal, los lineales generalizados, los de regresión no paramétrica y los de análisis discriminante; pero, con la limitación de no poder realizar un análisis explicativo del modelo ajustado (Menacho, 2014).

Las Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Network - ANN) son modelos computacionales que suelen estar inspirados en el cerebro humano. Están diseñadas para resolver problemas complejos de clasificación, identificación, diagnóstico, optimización o predicción. Las redes neuronales son particularmente útiles en casos para los cuales el comportamiento de los datos no es lineal; permiten el aprendizaje en tiempo real, y su estructura distribuida les otorga cierta tolerancia a fallos, lo que las hace ideales para aplicaciones dinámicas y de alta complejidad. Méndez-Castillo et al. (2025) sugieren que el uso de redes neuronales puede ser útil para capturar mejor los procesos subyacentes a los cambios.

El auge, dinámica y complejidad del comercio electrónico ha generado una gran cantidad de datos sobre las transacciones de los clientes. Si bien estos datos son valiosos, su volumen y complejidad dificultan la extracción de información útil para la toma de decisiones. En este contexto, se presenta la necesidad de analizar un conjunto de datos de transacciones de una empresa de comercio electrónico con sede en el Reino Unido para identificar patrones de consumo, comprender el

comportamiento del consumidor y vislumbrar el enfoque de ventas en el producto insignia, con el objetivo de predecir el precio del *Popcorn Holder* a través del uso de una red neuronal artificial, identificando patrones de consumo que den la pauta para el reconocimiento de patrones en comercio electrónico para la venta del producto insignia.

2. Materiales y métodos

A continuación, se presenta la metodología desarrollada, con un enfoque basado en análisis de datos y redes neuronales.

2.1 Metodología

2.1.1 Análisis de datos

El comercio electrónico es el uso de las tecnologías de la informática y las telecomunicaciones para habilitar las transacciones comerciales de productos o servicios entre las empresas, entre estas y particulares o con el Estado (Malca, 2001). De acuerdo con Kotler y Keller (2021), un producto se puede clasificar en 5 niveles: beneficio básico; producto genérico; producto esperado; producto aumentado y, producto potencial. Cabe hacer mención que *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* (contenedor para palomitas de maíz), se puede considerar un producto esperado o aumentado, dependiendo su presentación.

Para la presente propuesta se analiza una base de datos (Dataset) correspondiente a las ventas mediante comercio electrónico para Alemania, Arabia Saudí, Australia, Austria, Baréin, Bélgica, Brasil, Canadá, Chipre, Dinamarca, Emiratos Árabes Unidos, España, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Hong Kong, Islandia, Islas del Canal, Israel, Italia, Japón, Líbano, Lituania, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República de Sud África, Singapur, Suecia, Suiza y Reino Unido. El conjunto de datos analizado fue de 536,350 registros, a los cuales se realizó un análisis preliminar con la finalidad de conocer el producto más vendido y el país con mayor consumo del producto seleccionado. De acuerdo con el análisis de los datos, se encontró que el país que genera la mayor cantidad de ventas es Reino Unido para el producto *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet*. Una vez identificado el producto, se filtraron 1,352 datos, los cuales se utilizaron para procesar la Red Neuronal.

2.1.2 Regresión lineal para predicción

En el ámbito de los problemas de predicción, las redes neuronales artificiales se utilizan de manera comparable a diversos modelos estadísticos, incluyendo los modelos de regresión lineal. No obstante, una de las limitaciones más notables de las redes neuronales es que, a diferencia de estos enfoques estadísticos, no permiten realizar un análisis explicativo detallado. Esto significa que, aunque son herramientas poderosas para identificar patrones y realizar predicciones precisas, no ofrecen la posibilidad de interpretar matemáticamente las relaciones entre las variables que componen el modelo.

Como producto del análisis de redes neuronales se obtuvo una ecuación lineal ($y = mx + b$) que representa el modelo. Los valores de 'm' y 'b' (pendiente e intersección) reflejan la relación aprendida por el modelo entre el número de periodo y el precio. Estos valores pueden ser interpretados para comprender cómo el modelo realiza la predicción.

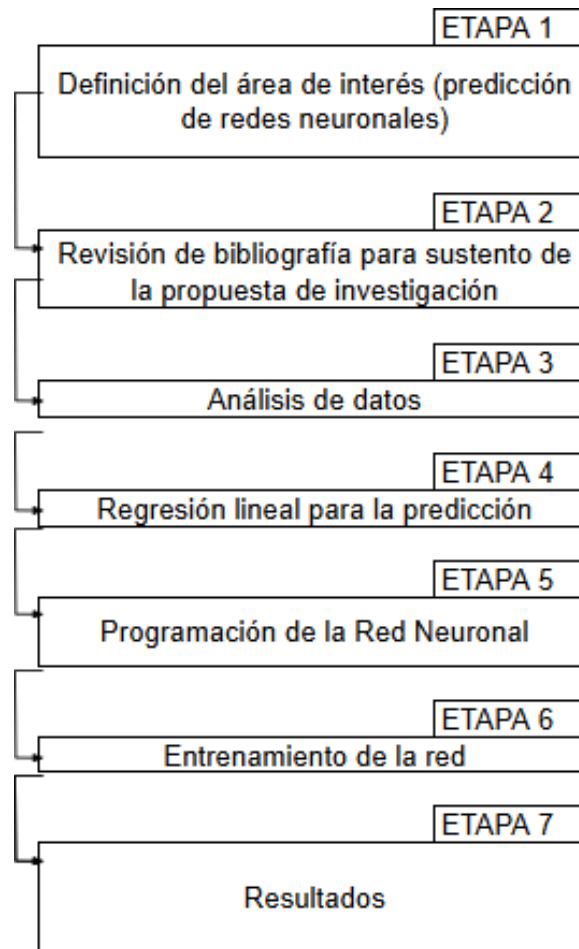


Figura 1. Diagrama representativo de la metodología aplicada. Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Diagram representing the applied methodology. Source: Prepared by the authors.

2.1.3 Implementación de la Red Neuronal

Se implementó una red neuronal artificial (ANN) con el objetivo de predecir el precio del producto *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* en el Reino Unido. La elección de una ANN se basó en su capacidad para aprender relaciones complejas entre variables y su eficacia en tareas de predicción.

Una vez que se obtuvo la nueva base de datos (*DataFrame*), se llamaron las librerías (*pandas*, *numpy*, *tensorflow*, *matplotlib*) para la construcción y entrenamiento del modelo. Se identificaron las variables dependientes e independientes; las fechas fueron ordenadas y se asignó un número de periodo

generando la variable x (independiente), y la variable precio tomó el valor de la variable y (dependiente). Se implementó una red neuronal secuencial (*Sequential*) con una capa densa (*Dense*) como capa de salida. La capa densa tiene una sola neurona, ya que se busca predecir un valor numérico (el precio). Se definió una forma de entrada que consta de 1 capa, indicando que la red recibe un único valor como entrada (el número de periodo).

2.1.4 Entrenamiento de la red

Se compiló el modelo utilizando el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0.1 y la función de pérdida (*mean squared error*). Se entrenó el modelo con los datos preparados, utilizando la columna número de periodos (*No_de_periodos*) como entrada, y la columna Precio como salida. Se definieron 3000 épocas (ciclos) para el entrenamiento, permitiendo al modelo iterar sobre los datos un número suficiente de veces, ajustando sus pesos y minimizando la función de pérdida.

La metodología se fundamenta en un enfoque basado en análisis de datos y redes neuronales que permiten obtener información para la toma de decisiones (Fig. 1).

3. Resultados y discusión

Las redes neuronales son extremadamente poderosas para resolver problemas complejos, como el reconocimiento de imágenes, el procesamiento del lenguaje natural y la predicción de datos, porque pueden modelar relaciones no lineales y patrones ocultos en los datos. Para Cañedo Figueroa et al. (2024), las redes neuronales son modelos matemáticos que intentan simular el funcionamiento de la mente humana para la toma de decisiones, que pueden llegar a tener cierto criterio de razonamiento con base en diversos datos obtenidos del entorno.

A diferencia de los algoritmos tradicionales, que se basan en instrucciones predefinidas y siguen un conjunto específico de pasos programados, las redes neuronales artificiales (ANN) requieren un proceso de entrenamiento previo. Este proceso implica que la red recibe una serie de datos (observaciones o ejemplos) a través de su capa de entrada, lo que le permite aprender y ajustar sus parámetros internos para poder realizar tareas como la clasificación o la predicción. En lugar de seguir un conjunto fijo de instrucciones, la red neuronal utiliza una regla de aprendizaje para modificar sus conexiones y optimizar su rendimiento a medida que se le presentan más datos.

En el siguiente pseudo-algoritmo se muestra el paso a paso llevado a cabo para programar la red neuronal (Tabla 1), se destaca que la base de datos inicial fue cargada en formato CSV (*Comma Separated Values Format* – formato de valores separados por comas), constando de 1,352 datos, filtrados de 536,350 registros iniciales.

Tabla 1. Pseudo-algoritmo del entrenamiento de la red neuronal.

Table 1. Pseudo-algorithm on neuralnetwork training.

1	Importar librerías (pandas, numpy)
2	Conectar Drive a Google Colab
3	Convertir el csv a DataFrame

4	Renombrar columnas
5	Ordenar el DataFrame por la columna ID_producto Mostrar la tabla ordenada
6	Para cada columna numérica en el DataFrame: Calcular la media, mediana, moda, desviación estándar, varianza y rango Almacenar las medidas en un diccionario Mostrar los resultados
7	Agrupar por cliente y sumar la cantidad comprada Encontrar el cliente que consumió más Mostrar el resultado
8	Encontrar el precio máximo Encontrar el producto asociado al precio máximo Mostrar el resultado
9	Agrupar por país y sumar la cantidad comprada Encontrar el país que más compró Mostrar el resultado
10	Agrupar por producto y sumar la cantidad vendida Encontrar el producto más vendido Mostrar el resultado
11	Agrupar por país y producto, luego sumar la cantidad Encontrar el producto más comprado para cada país Mostrar resultados
12	Filtrar el DataFrame para obtener datos de Reino Unido y <i>Popcorn Holder</i> Convertir 'Fecha_transacción' a datetime Ordenar por 'Fecha_transacción'
13	Para cada columna numérica en el DataFrame: Calcular la media, mediana, moda, desviación estándar, varianza y rango Almacenar las medidas en un diccionario Mostrar los resultados
14	Agrupar por cliente y sumar la cantidad comprada Encontrar el cliente que compró más Mostrar el resultado
15	Encontrar el precio máximo Encontrar el producto asociado al precio máximo Mostrar el resultado
16	Agrupar por país y sumar la cantidad comprada Encontrar el país que más compró Mostrar el resultado
17	Agrupar por producto y sumar la cantidad vendida Encontrar el producto más vendido Mostrar el resultado
18	Agrupar por país y producto, luego sumar la cantidad Encontrar el producto más comprado para cada país Mostrar resultados
19	Filtrar el DataFrame para obtener datos de Reino Unido y <i>Popcorn Holder</i> Convertir 'Fecha_transacción' a datetime Ordenar por 'Fecha_transacción' Crear columna 'No_de_periodos' Mostrar el DataFrame resultante
20	Importar tensorflow como tf

21	Extraer fecha, número de periodo y precio Convertir 'Fecha_transacción' a solo fecha Mostrar los datos extraídos
22	Convertir la lista de periodos a una cadena Convertir la lista de precios a una cadena
23	Definir la arquitectura del modelo Compilar el modelo con optimizador y función de pérdida
24	Entrenar el modelo con los datos Mostrar mensaje de modelo afinado
25	Graficar la pérdida del modelo durante el entrenamiento
26	Graficar los precios en función del número de periodos
27	Predecir el precio para un periodo dado Mostrar el resultado
28	Mostrar los pesos de la capa Mostrar la ecuación del modelo

En las primeras épocas, la magnitud de pérdida disminuyó rápidamente, véase en la Fig. 2. Esto indica que la red neuronal está aprendiendo rápidamente la relación general entre el número de periodo y el precio del *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* (contenedor para palomitas de maíz).

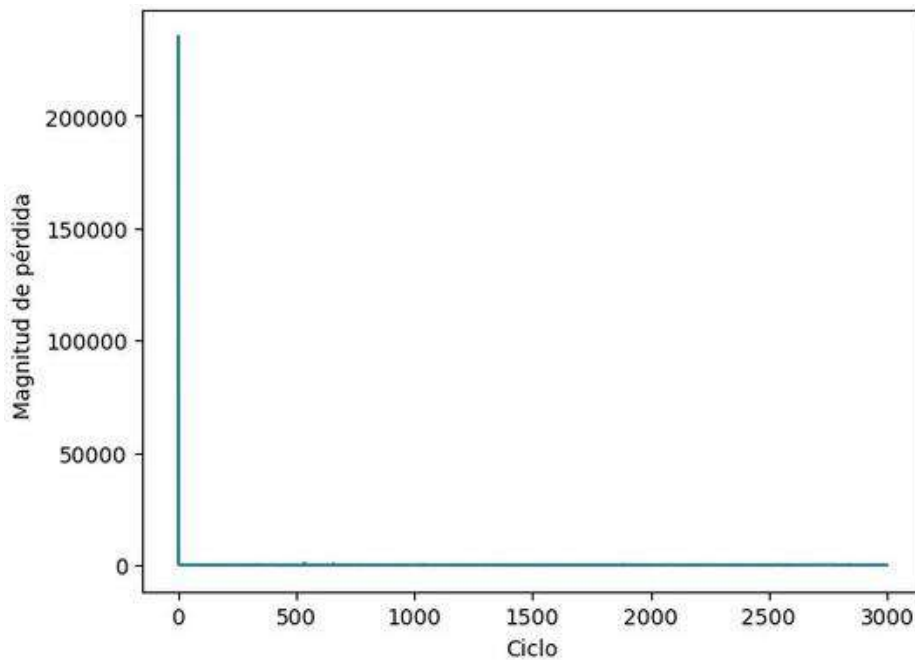


Figura 2. Gráfica representativa de la magnitud de la pérdida para análisis de 3000 periodos. Fuente: Elaboración propia con base en el entrenamiento de la red neuronal.

Figure 2. Graph showing the magnitude of loss for an analysis of 3,000 periods. Source: Prepared by the author based on neural network training.

La red ajustó sus pesos y sesgos para realizar predicciones. A medida que el entrenamiento progresó, la disminución de la pérdida se volvió gradual. Esto es un comportamiento típico en el entrenamiento de redes neuronales, ya que el modelo se va acercando a una solución óptima, y los ajustes de los pesos y sesgos se vuelven más finos.

Cuando el entrenamiento continuó por más épocas, la pérdida se estabilizó en un valor mínimo, indicando que la red neuronal convergió hacia una solución óptima para el conjunto de datos filtrado.

En una segunda corrida se tuvo que la disminución de la pérdida durante el entrenamiento indica que el modelo está aprendiendo a realizar predicciones más precisas. Sin embargo, la ralentización en la disminución de la pérdida en las últimas épocas sugiere que el modelo podría estar llegando a un límite en su capacidad de aprendizaje con la configuración actual. Esto podría ser un indicio de que se requiere una arquitectura más compleja. La gráfica de magnitud de pérdida muestra una disminución rápida en las primeras épocas (Fig. 3).

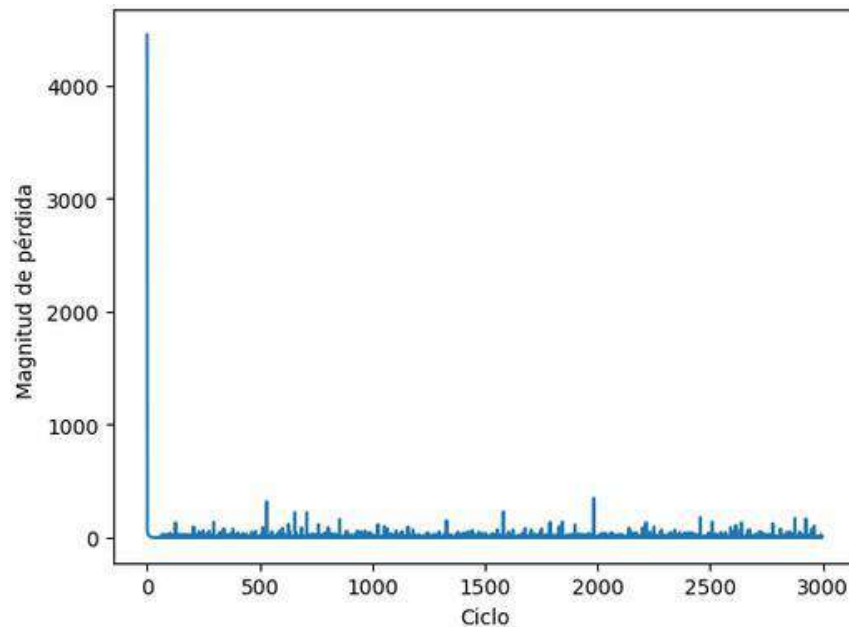


Figura 3. Gráfica representativa de la segunda corrida para la magnitud de la pérdida para análisis de 3000 periodos. Fuente: Elaboración propia con base en el entrenamiento de la red neuronal.

Figure 3. Graph representing the second run of magnitude loss analysis for 3,000 periods. Source: Prepared by the author based on neural network training.

Se graficó la ecuación del modelo $mx + b$ con pendiente -0.00467914 y ordenada al origen 12.235434 para visualizar la capacidad del modelo al capturar la tendencia de los precios a lo largo del tiempo (Fig. 4). Si bien la ecuación del modelo se ajusta en cierta medida a los datos, existen desviaciones significativas en algunos puntos. Esto indica que el modelo no es perfecto y que existen factores adicionales que influyen en el precio del producto.

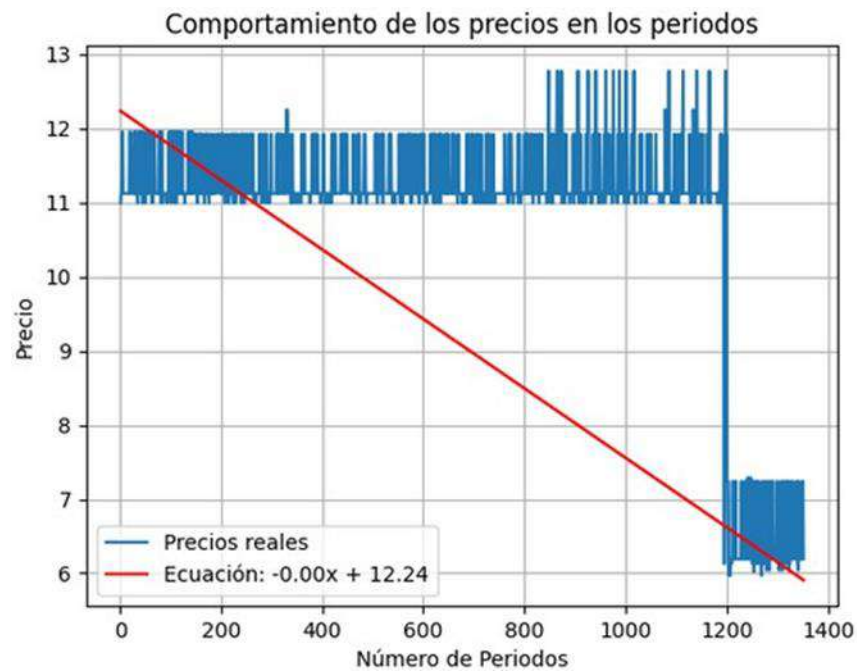


Figura 4. Gráfica de modelo para tendencia de los precios a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia con base en el entrenamiento de la red neuronal.

Figure 4. Model graph showing price trends over time. Source: Prepared by the authors based on neural network training.

El modelo fue capaz de realizar predicciones para un periodo específico. Al comparar la predicción con el precio real, se observó una diferencia. Aunque el modelo logró capturar la tendencia general de los precios, es importante destacar que existen desviaciones en ciertos puntos.

La gráfica mostró una tendencia general a la baja en los precios a lo largo de los periodos analizados. Si bien al inicio se observa una relativa estabilidad alrededor de los 12 euros, los precios experimentan una disminución sostenida, reflejada en la línea roja de tendencia. Sin embargo, es importante notar que esta tendencia general se ve interrumpida por numerosas fluctuaciones a corto plazo, lo que sugiere la presencia de factores adicionales que influyen en la dinámica de los precios más allá de esta tendencia a largo plazo. La ecuación de la línea de tendencia ($y = -0.00x + 12.24$) confirma la disminución de los precios.

Las medidas de tendencia central para el precio del *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* en el Reino Unido revela precios relativamente estables alrededor de 12 (12.66), con la media (11.94) y la mediana (11.53) muy cercanas, sugiriendo una distribución simétrica o ligeramente sesgada. La moda, ligeramente inferior, indica una posible concentración de precios más bajos, quizás debido a promociones u ofertas, sin embargo, la similitud entre media y mediana apunta a una distribución no muy sesgada.

Las medidas de dispersión para el precio del *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* en el Reino Unido muestra una variabilidad moderada en los precios. El rango (655.49), que representa la diferencia entre el precio máximo y mínimo, indica la amplitud total de precios observados. La desviación estándar (8.49), que mide la dispersión promedio de los precios alrededor de la media, sugiere que la mayoría de los precios se concentran relativamente cerca del promedio. La varianza (72.09), siendo

el cuadrado de la desviación estándar, refuerza esta idea. En conjunto, estas medidas revelan que, si bien existe cierta variación en los precios del *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet*, la mayoría de ellos se encuentran dentro de un rango relativamente cercano al promedio, con valores extremos que contribuyen a un rango más amplio.

4. Conclusiones

El análisis del producto *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* en el Reino Unido revela que, en general, el precio se mantuvo relativamente estable a lo largo de los periodos observados. Aunque existieron fluctuaciones, la red neuronal entrenada logró capturar la tendencia, generando una ecuación que describe la relación entre el número de periodos y el precio.

La red neuronal, tras su entrenamiento, demostró la capacidad de predecir el precio del *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* en periodos futuros con cierta precisión. Esto sugiere su potencial como herramienta para la toma de decisiones en la gestión de inventarios y la fijación de precios.

Se identificó al Reino Unido como el país con mayor consumo total en el *data set*. Además, el producto *Popcorn Holder* o *Popcorn Bouquet* se posicionó como el más consumido a nivel global. Estos hallazgos brindan información valiosa sobre las preferencias de los consumidores y los mercados con mayor demanda. Se identificó al cliente número 14646 como el que realizó la mayor cantidad de compras en el periodo analizado. Este dato puede ser relevante para estrategias de fidelización y segmentación de clientes.

Con este análisis se puede concluir la veracidad del estudio realizado por ICEX España Exportación e Inversiones acerca de que Reino Unido mantiene su posición hasta el 2023 como el mercado de comercio electrónico más grande de Europa y tercero del mundo. De acuerdo con la información filtrada, llegamos a la conclusión que, por lo menos para esta empresa, su principal consumidor es dicho país. En contextos como el comercio electrónico, donde el Reino Unido se posiciona como líder, las redes neuronales suelen ser empleadas para predecir tendencias de compra o basarse en encontrar patrones de comportamiento, de esta manera, podemos lograr potencializar el mercado, teniendo oportunidades de crecimiento en el sector.

Contribuciones de los autores

Para el desarrollo de la investigación, la primera autora realizó: la búsqueda, obtención y limpieza de datos; además, realizó la búsqueda y sustento teórico; así como la programación de la red neuronal; la obtención de resultados; y, la reducción del documento. El segundo autor, contribuyó con: el sustento teórico de la propuesta; la programación de la red neuronal; y, la redacción del documento.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por proveer al base académica y desarrollo profesional para el desarrollo de la presente propuesta.

Conflicto de interés

Los autores declaran bajo protesta de decir la verdad, que a su real entender, no existe conflicto de interés para el desarrollo o validación de la presente propuesta.

5. Referencias

- Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4(11): e00938. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>
- Basogain-Olabe, X (2008). REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y SUS APLICACIONES. Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibersitatea. *Curso 00147-06-1-02 del programa Comunicaciones, Electrónica y Control*. https://ocw.ehu.eus/file.php/102/redes_neuro/Course_listing.html
- Drew, S. (2003). Strategic Uses of E-Commerce by SMEs in the East of England. *European Management Journal*, 21(1), 79-88. [https://doi.org/10.1016/S0263-2373\(02\)00148-2](https://doi.org/10.1016/S0263-2373(02)00148-2)
- Fedushko, S., Shevchuk, L., Poritska, A., Kravets, R., & Tymovchak-Maksymets, O. (2021). E-Commerce and E-Health Strategies and Implementation Activities in the United Kingdom: Review Study, 10-20. *Digital Libraries*. <https://arxiv.org/abs/2108.08271v1>. Cornell University. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.08271>
- Guijarro, P. [Pilar Guijarro García] (2019). Popcorn Holder-Big Idea [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=n6BUxQQ7y10>
- González García, J. (2020). Comercio electrónico en China y México: surgimiento, evolución y perspectivas. *México y la Cuenca del Pacífico*, 9(27), 53-84. <https://doi.org/10.32870/mycp.v9i27.688>
- Grigorescu, A., Oprișan, O., Lincaru, C., & Pirciog, C. S. (2023). E-Banking Convergence and the Adopter's Behavior Changing Across EU Countries. *Sage Open*, 13(4). <https://doi.org/10.1177/21582440231220455>
- Haglin, J. M., Jimenez, G., & Eltorai, A. E. M. (2019). Artificial neural networks in medicine. *Health and Technology*, 9, 1 – 6. <https://doi.org/10.1007/s12553-018-0244-4>
- Hall, M., & Grogan, S. (2017). Research considerations when investigating psychological factors and health-related issues in online contexts. In Bundon, A. (Ed.) *Digital Qualitative Research in Sport and Physical Activity*, pp. 93-106. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315304557-7>
- Hilera, R., & Martínez, V. (1995). Redes neuronales artificiales Fundamentos, modelos y aplicaciones. Colección: *Informática*. RA-MA Editorial. <https://www.researchgate.net/publication/44343683>
- Hood, N., Urquhart, R., Newing, A., & Heppenstall, A. (2020). Sociodemographic and spatial disaggregation of e-commerce channel use in the grocery market in Great Britain. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 55, 102076. [10.1016/j.jretconser.2020.102076](https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2020.102076)

- ICEX España Exportación e Inversiones. (2023). Reino Unido: Resumen ejecutivo e-País 2023. <https://www.icex.es/content/dam/icex/centros/reino-unido/documentos/2024/informe-e-pais-comercio-electronico-reino-unido-2024-resumen-ejecutivo.pdf>
- Jaradt, N. M. (2018). A critical analysis of e-commerce contracts with relevance to the UAE and the United Kingdom. *International Journal of Law and Management*, 60(2): 586-594. <https://doi.org/10.1108/IJLMA-01-2017-0016>
- Kalogirou, S. A. (1999). Applications of artificial neural networks in energy systems. A review. *Energy Conversion and Management*, 40(10), 1073-1087. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00012-6)
- Kalogirou, S. (2000). Applications of artificial neural-networks for energy systems. *Applied Energy*, 67(1-2), 17-35. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(00\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00005-2)
- Kirby-Hawkins, E., Birkin, M., & Clarke, G. (2018). An investigation into the geography of corporate e-commerce sales in the UK grocery market. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(6), 1148 – 1164. <https://doi.org/10.1177/2399808318755147>
- Kotler, P., & Keller, K. L. (2001). CAPÍTULO 17: Administración de líneas de producto, marcas y empaques. En: *Dirección de Mercadotecnia, Análisis, Planeación, Implementación y Control 8a. Ed.* Northwestern University. 84 pp. Pearson Education. <https://es.scribd.com/doc/54545203/Direccion-de-Mercadotecnia-8a-Ed-Kotler>
- Koya, K., Venture Matrix Consultants, & Jones, D. (2021). A Path of Roses and Financial Literacy: Exploring the Usability of UK's Digital Banking Services to Improve Younger Adult Adoption. *APIT'21: Proceedings of the 2021 3rd Asia Pacific Information Technology Conference*. pp. 18-25. <https://doi.org/10.1145/3449365.3449369>
- Kujawa, S., & Niedbała, G. (2021). Artificial Neural Networks in Agriculture. *Agriculture*, 11(6), 497. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060497>
- Larranaga, P., Inza, I., & Moujahid, A. (1997). Tema 8. redes neuronales. *Redes Neuronales*. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. pp. 12, 17. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea. <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/t8neuronales.pdf>
- Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2022). A Survey of Convolutional Neural Networks: Analysis, Applications, and Prospects. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33(12), 6999-7019. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3084827>
- Liu, W., Wang, Z., Liu, X., Zeng, N., Liu, Y., & Alsaadi, F. E. (2017). A survey of deep neural network architectures and their applications. *Neurocomputing*, 234, 11-26. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.12.038>
- Lloyd, I. J. (2020). 22. International and European initiatives in e-commerce. In: *Information Technology Law 9th Ed.*, pp. 393-406. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/he/9780198830559.003.0022>
- Malca, Ó. (2001). Comercio electrónico. Universidad del Pacífico. <http://hdl.handle.net/11354/76>
- Menacho Chiok, C. H. (2014). Modelos de regresión lineal con redes neuronales. *Anales Científicos*, 75(2), 253-260. <https://doi.org/10.21704/ac.v75i2.961>

- Méndez-Castillo, A. K., Contreras-López, E., Pérez-Flores, J. G., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Soto-Vega, K., Ángel-Jijón, C., & Cervantes-Elizarrarás, A. (2025). Improving kinetic model fitting for total titratable acidity in bananas using genetic algorithms. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 19, Special Issue, e1847. <http://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1847>
- Ponzi, V., & Napoli, C. (2025). Graph Neural Networks: Architectures, Applications, and Future Directions. *IEEE Access*, 13, 62870-62891. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558752>
- Robayo-Botiva, D. M. (2020). El comercio electrónico: concepto, características e importancia en las organizaciones. Universidad Cooperativa de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables, Administración de Empresas, Villavicencio. <https://doi.org/10.16925/gclc.13>
- Rokicki, T. (2018). E-commerce market in Europe in B2C. *Information System in Management*, 7(2), 133-140. <https://bw.sggw.edu.pl/info/article/WULSd0c9b81c58c54578b121ac123fc620a4/>
- Salas, R. (2004). Redes neuronales artificiales. Universidad de Valparaíso. Departamento de Computación, 1(1), 1-7. https://www.academia.edu/24633757/Redes_Neuronales_Artificiales
- Tkáč, M., & Verner, R. (2016). Artificial neural networks in business: Two decades of research. *Applied Soft Computing*, 38, 788-804. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.040>
- Wu, L., Cui, P., Pei, J., Zhao, L., & Guo, X. (2022). Graph Neural Networks: Foundation, Frontiers and Applications. *Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. pp. 4840-4841. <https://doi.org/10.1145/3534678.3542609>
- Wu, Z. (2024). The Rise of Digital Banking in the UK Financial Sector and Its Impact on Commercial Banks. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 120, 179-184. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/120/20242553>
- Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., & Yu, P. (2019). A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(1), 4-24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>
- Xie, Y., Takikawa, T., Saito, S., Litany, O., Yan, S., Khan, N., Tombari, F., Tompkin, J., Sitzmann, V., & Sridhar, S. (2022). Neural Fields in Visual Computing and Beyond. *Computer Graphics Forum*, 41(2), 641-676. <https://doi.org/10.1111/cgf.14505>
- Yamazaki, K., Vo-Ho, V., Bulsara, D., & Le, N. (2022). Spiking Neural Networks and Their Applications: A Review. *Brain Sciences*, 12(7), 863. <https://doi.org/10.3390/brainsci12070863>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Valorización de pellets combustibles usando aserrín de 23 especies de maderas mexicanas

Valorization of fuel pellets using sawdust from 23 Mexican species

M.A. Ramírez-Ramírez¹, A. Carrillo-Parra², F. Ruiz-Aquino³, C. Luján-Álvarez⁴, J.J. Hernández-Solís⁵, N. Carrillo-Ávila⁶, L.F. Pintor-Ibarra¹, J.G. Rutiaga-Quiñones^{1*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Av. Fco. J. Múgica s/n, Col. Felicitas del Rio, Morelia, Michoacán, C.P. 58040, México.

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Boulevard del Guadiana 501, Ciudad Universitaria, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

³ Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Av. Universidad s/n, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, C.P. 68725, México.

⁴ Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Carretera km 2.5 Delicias, Chihuahua, C.P. 33000, México.

⁵ Tecnológico Nacional de México – Campus Instituto Tecnológico de la Zona Maya, Carretera Chetumal – Escárcega km 21.5, Ejido Juan Sarabia, Quintana Roo, C.P. 77695, México.

⁶ Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, San Martinito, Carretera Federal México – Puebla km 56.5, San Martinito, Municipio de Tlahuapan, Puebla, C.P. 74100, México.

*Correspondencia: rutiaga@umich.mx (José Guadalupe Rutiaga-Quiñones)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1829>

Recibido: 29 de enero de 2025; Aceptado: 07 de marzo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Rubén Francisco González-Laredo

Resumen

Se ha observado un deterioro medioambiental debido al crecimiento económico enlazado al respectivo consumo de combustibles fósiles a nivel mundial, pero también se han desarrollado investigaciones sobre biocombustibles alternativos para intentar reducir el uso de energía fósil. En este sentido, la biomasa lignocelulósica, como energía renovable, juega un rol importante para la generación de biocombustibles sólidos densificados, procurando disminuir la utilización de hidrocarburos fósiles y promoviendo una energía ecoeficiente. En el presente estudio se elaboraron pellets combustibles con 23 muestras de aserrín obtenido en diferentes empresas forestales en 5 estados de la República Mexicana. Se realizó una evaluación física, mecánica y energética de los

pellets obtenidos. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las evaluaciones realizadas. Los resultados más relevantes variaron como sigue: contenido de humedad (2.69 – 8.73 %), densidad de partícula (1.08 – 1.32 g/cm³), densidad a granel (532 – 668 kg/m³), índice de resistencia al impacto (100 a 250 %), resistencia a la compresión (178 – 1542 N/mm), poder calorífico (15.42 – 20.85 MJ/kg) y densidad energética (9.32 – 13.07 GJ/m³). De acuerdo con la evaluación física, mecánica y energética, los pellets elaborados con las diferentes muestras de aserrín tienen en general buena calidad para su uso residencial local o industrial.

Palabras clave: madera de pino, maderas latifoliadas, biocombustibles densificados, biomasa residual, bioenergía

Abstract

Environmental deterioration has been observed due to economic growth linked to the global consumption of fossil fuels. However, research has also focused on developing alternative biofuels to reduce fossil energy consumption. In this context, lignocellulosic biomass plays a crucial role as a renewable energy in producing densified solid biofuels, promoting reduced dependence on fossil fuels, and supporting cleaner energy initiatives. In the current study, fuel pellets were made using 23 samples of sawdust collected from various forest mills across five states in Mexico. A physical, mechanical and energetic assessment of the obtained pellets was conducted, revealing significant statistical differences in the evaluations. The most notable results were as follows: moisture content ranged from 2.69 to 8.73 %; particle density varied from 1.08 to 1.32 g/cm³; bulk density was found to be between 532 and 668 kg/m³; impact strength index ranged from 100 to 250 %, compressive strength values varied from 178 to 1542 N/mm; calorific value was between 15.42 and 20.85 MJ/kg; and energy density ranged from 9.32 to 13.07 GJ/m³). Based on the physical, mechanical and energetic evaluations, the pellets produced from the diverse sawdust samples appear suitable for local residential or industrial use.

Keywords: Pine wood, hardwoods, densified biofuels, residual biomass, bioenergy

1. Introducción

En recientes décadas se ha observado un deterioro ambiental derivado del acelerado crecimiento económico con el respectivo consumo de energía fósil a nivel mundial (García *et al.*, 2016; Adebayo *et al.*, 2021; Yuping *et al.*, 2021), lo que también ha propiciado investigaciones y desarrollos sobre biocombustibles alternativos buscando la reducción del uso de combustibles fósiles (Østergaard *et al.*, 2020; Baasch, 2021). Estas acciones promueven el interés sobre la aplicación y adopción de prácticas y tecnologías más amigables, sustentables, respetuosas, limpias y renovables con el medio ambiente (Amador-Hernández, 2015; Rennkamp *et al.*, 2017; Qazi *et al.*, 2019).

En ese escenario, los recursos renovables, como la biomasa, destaca como fuente abundante y versátil, que puede tener alto significado en el proceso de cambio hacia una matriz energética más ecológica, e inversiones en este campo de las energías renovables podrían ayudar en la solución de esta problemática (Moran *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017). La biomasa, referida como la materia prima orgánica no fosilizada proveniente de animales y plantas, supone una fuente renovable de energía,

ya que se puede transformar en los llamados biocombustibles (Velázquez-Martí, 2018). Existen diversas fuentes y tipos de biomasa generados principalmente de las actividades de producción marina, agrícola y forestal, y en esencia se pueden distinguir dos grandes grupos: biomasa derivada de plantaciones energéticas y la biomasa procedente de residuos o restos de las actividades antropogénicas (Velázquez-Martí, 2018). Las diferentes fuentes de biomasa tienen potencial para ser transformada y generar biocombustibles gaseosos, líquidos o sólidos (Velázquez-Martí, 2018).

La biomasa forestal usada sustentablemente puede generar energía neutra en carbono y puede ser potencialmente una solución para reemplazar a los combustibles fósiles (Hiloidhari *et al.*, 2019; Sulaiman *et al.*, 2020). Es conocido que a lo largo del proceso del procesamiento de la madera se generan grandes cantidades de subproductos lignocelulósicos, como aserrín, corteza y viruta. Además, existen algunas evidencias de que este material puede usarse para la generación de biocombustibles sólidos densificados (Morales-Máximo *et al.*, 2020; Bandara *et al.*, 2021) y al emplearlos en procesos de combustión pueden promover estrategias para la reducción de compuestos responsables del efecto invernadero (Morales-Máximo *et al.*, 2022; Nwabueze y Leggett, 2024).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue la elaboración de biocombustibles sólidos densificados, *i.e.* pellets, usando aserrín de 23 especies de madera derivado del proceso de aserrío y recolectado en cinco estados de la República Mexicana. Este material de estudio fue previamente caracterizado para conocer sus propiedades físicas, químicas y energéticas (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020; Chávez-Rosales *et al.*, 2021; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021) y se ha reportado la elaboración y caracterización de sus briquetas bicomcombustibles (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021; 2022). Los resultados obtenidos no solamente contribuyen al conocimiento científico de estos pellets, sino que también promoverían su uso local, ayudando a mitigar la degradación medioambiental, e impactando en la gestión sostenible de los recursos lignocelulósicos.

2. Materiales y métodos

Veintitrés muestras de aserrín, sin corteza y sin tratamiento químico, derivado del procesamiento primario de la madera se recolectaron como donación en varias compañías y ejidos forestales en cinco estados mexicanos: Quintana Roo [Ejido Noh-Bec (19°08'26" N, 88°09'23" O), Ejido Petcacab (19°17'00" N, 88°13'21" O) y Ejido Tres Garantías (18°11'21" N, 88°59'11" O)], Chihuahua [El Largo (29°41'12" N, 108°17'02" O), Agua azul (26°51'00" N, 106°56'24" O), Grupo Gazo (26°56'09" N, 105°38'12" O) y Multimaderas (26°55'41" N, 105°41'45" O)], Michoacán [Maderería Zamora (18°45'39" N, 103°11'21" O), Maderas Preciosas Don Jesús (18°48'08" N, 102°55'40" O) y Lázaro Cárdenas (18°44'34" N, 102°46'52" O)], Durango [Grupo Sezarik (25°03'15" N, 105°25'07" O), Maderas y Tarimas Alba (25°05'50" N, 105°26'44" O), Vencedores (24°25'41" N, 105°42'21" O), La Cañita (24°27'44" N, 106°01'32" O) y Pueblo Nuevo (23°46'36" N, 105°21'58" O)], y Oaxaca [Productora Comunal de Muebles Ixtlán (17°19'26" N, 96°28'37" O) y Aserradero Mapsi (17°19'25" N, 96°29'02" O)]. En la Tabla 1 se muestran datos sobre las maderas en proceso en las diferentes industrias y de las cuales se obtuvo el aserrín en orden de recolección. Para el caso de las maderas de pino y encino, no fue posible hacer una separación por especies debido a que la madera se transporta mezclada del bosque a la industria forestal. Para cada caso, aproximadamente 50 kg de aserrín fueron colectados. De cada pila de aserrín se eligió una al azar y de ella se tomaron muestras de aserrín de la parte alta, media y baja.

2.1 Producción de pellets

La humedad inicial de las muestras de aserrín recolectado varió ampliamente con valores reportados de 6.0 a 75.2 % (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020), pero previo al proceso de densificación, las muestras se dejaron secar al aire libre, hasta un contenido de humedad de aproximadamente 12 %. Todos los tipos de aserrín se usaron sin hacer separación por tamaño de partícula, debido a que un estudio previo con esta misma biomasa concluye que la granulometría de estos materiales es adecuada para la elaboración de biocombustibles sólidos densificados (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). Se han reportado también resultados sobre las propiedades de briquetas obtenidas con estos mismos materiales (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021; 2022). Los pellets se produjeron utilizando una peletizadora industrial de discos planos (Marca ZSLP-R300), con canales de 8 mm de longitud y 6 mm de diámetro con una capacidad de 250 a 300 kg/h. Una vez enfriados los pellets fueron colocados en bolsas de plástico selladas herméticamente, hasta ejecutar los ensayos de caracterización.

2.2 Evaluación física, mecánica y energética de los pellets

Se determinó la humedad de los pellets en un horno de secado (Binder GmbH, model BD 260, Tuttlingen, Germany) por triplicado (EN 18134-3, 2015). De cada muestra de pellets, según su procedencia, se tomaron aleatoriamente 20 pellets para medir su diámetro y longitud usando un vernier (Sgarbossa *et al.*, 2015), además se midió su masa para calcular la densidad de partícula (Kocer y Kurklu, 2020). La densidad a granel se determinó por triplicado (EN ISO 17828, 2015).

El índice de resistencia al impacto se obtuvo a partir del número total de piezas de pellets producidas después de dejar caer al suelo cada uno de los 20 pellets, por procedencia, cuatro veces desde 1.8 m de altura (ASTM D440-68, 2007). La resistencia a la compresión en los pellets se efectuó por triplicado en una máquina universal (INSTRON 300 DX, Instron, Norwood, Ma, USA), con una capacidad de carga de 300 kN. Cada pellet se colocó horizontalmente en el probador de compresión, luego se aplicó la carga a una velocidad constante de 0.305 mm/min hasta que el pellet falló por agrietamiento (ASTM D2166-85, 2008).

El análisis proximal en los pellets sin humedad, comprendió la determinación por triplicado de cenizas (UNE-EN ISO 18122, 2023), material volátil (ASTM E872-82, 2013) y carbono fijo; este último fue calculado por diferencia de 100 menos contenido de cenizas y material volátil (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021). El poder calorífico superior de los materiales densificados se evaluó por triplicado (UNE-EN 14918, 2011), usando un calorímetro semiautomático (LECO AC600, MI, USA). La densidad energética de los pellets se determinó multiplicando su densidad por su poder calorífico.

2.3 Análisis estadístico

Para cada determinación, se efectuó un análisis de varianza y una prueba Tukey y los datos se analizaron con un nivel de confianza estadística de 95 %, usando el programa Statgraphics Centurion (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, USA). Los resultados obtenidos se presentan con el valor medio y su desviación estándar ($\pm$).

3. Resultados y discusión

3.1 Evaluación física de los pellets

En la Tabla 1 se observan los resultados del contenido de humedad de los pellets, que variaron de 2.69 a 8.73 %, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En concordancia con la norma ISO 17225-2 (2021), los resultados aquí obtenidos están por debajo del valor recomendado, por lo que podría garantizarse buena combustión (Hansen *et al.*, 2009) debido a que un menor contenido de humedad incrementa el poder calorífico de los combustibles (Aguilar-Sánchez *et al.*, 2022). Para pellets de pino se ha reportado 4.8 % de humedad (Núñez-Retana *et al.* 2019) y otros estudios reportan diversos valores en pellets elaborados con diversas biomásas lignocelulósicas (8.41 – 8.68 %) (Acampora *et al.*, 2021), (7.9 – 11.1 %) (Bandara *et al.*, 2021), (7.7 – 10.1 %) (Ilari *et al.*, 2021).

Tabla 1. Nombre de las maderas, procedencia y humedad de los pellets obtenidos

Table 1. Name of woods, origin and moisture content of pellets

Clave	Nombre científico	Nombre común	Procedencia	Contenido de humedad (%)
1	<i>Swartzia cubensis</i> (Britt. and Willson) Sandl.	Kátalox	Quintana Roo	8.73 ± 0.01 ^m
2	<i>Lysiloma latisiliquum</i> L. Benth.	Tzalam		6.37 ± 0.01 ⁱ
3	<i>Manilkara zapota</i> (L.) v. Royen	Chicozapote		5.21 ± 0.03 ^g
4	<i>Swietenia macrophylla</i> King	Caoba		3.43 ± 0.00 ^b
5	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Chihuahua	4.63 ± 0.03 ^e
6	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.04 ± 0.01 ^c
7	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.89 ± 0.02 ^h
8	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.58 ± 0.02 ^{de}
9	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Michoacán	4.78 ± 0.01 ^e
10	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.48 ± 0.05 ^h
11	<i>Pinus</i> spp.	Pino		2.69 ± 0.01 ^a
12	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.77 ± 0.04 ^h
13	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.54 ± 0.02 ^d
14	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Durango	6.68 ± 0.05 ^j
15	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.48 ± 0.05 ^j
16	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.43 ± 0.03 ⁱ
17	<i>Quercus</i> spp.	Encino		5.08 ± 0.01 ^f
18	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.59 ± 0.03 ^{de}
19	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.87 ± 0.02 ^k
20	<i>Quercus</i> spp.	Encino		6.58 ± 0.01 ^j
21	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.02 ± 0.04 ⁱ
22	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Oaxaca	7.17 ± 0.03 ^l
23	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.84 ± 0.03 ^h

Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

El diámetro de los pellets varió de 5.81 a 6.00 mm (Tabla 2), observándose diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). El diámetro de la matriz del equipo es precisamente de 6.00 mm, pero suele haber ciertas variaciones. Por ejemplo, usando la misma peletizadora, se han reportado diámetros de 6.03 a 6.05 mm en pellets de aserrín de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018) y de 5.80 a 6.14 mm en pellets elaborados con aserrín de diversas biomásas lignocelulósicas (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). El diámetro de los pellets aquí producidos satisface el requerimiento de la norma UNE EN 14961-6 (2012) de tener un valor de 6 ± 1 mm (Tabla 2).

La longitud de los pellets varió de 10.74 a 26.29 mm (Tabla 2) con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) que corresponde a los pellets de maderas de pino; los otros resultados de las maderas tropicales y de los encinos se encuentran dentro de este rango. Valores de 20.44 y 24.65 mm han sido reportados para pellets de aserrín de pino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). En el caso del aserrín de las maderas tropicales, los resultados variaron de 15.48 a 20.44 mm; mientras que se han reportado longitudes de 13.17 a 17.37 mm para pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Para los encinos, los valores aquí encontrados fueron de 15.77 y 25.46 mm; para pellets de aserrín de encino se han reportado longitudes de 26.23 y 33.69 mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Es común que en el proceso de densificado se obtengan diferentes longitudes (Michelena y Martín, 2008) y en este estudio los valores obtenidos cumplen con los requerimientos para pellets clase D06, según la norma UNE EN 14961-2 (2012).

El peso de los pellets varió de 0.33 a 0.88 g (Tabla 2), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Como era de esperarse, los resultados más bajos de peso corresponden a los pellets de menor longitud. Valores de 0.72 a 1.79 g se han reportado para pellets elaborados con diferentes tipos de biomasa lignocelulósica (Carrillo-Parra *et al.*, 2021).

La densidad de partícula varió de 1.08 a 1.32 g/cm³ (Tabla 1), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En los pellets de aserrín de pino, la densidad de partícula promedio fue de 1.17 g/cm³ (1.08 – 1.22 g/cm³), ligeramente menor al promedio de 1.25 g/cm³ reportada para pellets de aserrín de pino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Mientras que para los pellets de encino el valor promedio fue de 1.20 g/cm³ (1.15 – 1.25 g/cm³), cercano a 1.29 g/cm³ reportado para pellets de aserrín de encino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Para los pellets de aserrín de maderas tropicales, los resultados variaron de 1.14 a 1.32 g/cm³ con valor promedio de 1.21 g/cm³. Finalmente, la densidad de partícula de los pellets es cercana a los valores reportados (1.12 – 1.13 g/cm³) en el manual de pellets (Thek y Obernberger, 2012), los que se encuentran dentro del rango sugerido por Mostafa *et al.* (2019) que va de 1.0 a 1.4 g/cm³.

La densidad a granel varió de 532 a 668 kg/m³ con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), como se muestra en la Tabla 2. En algunas investigaciones se han dado a conocer diversos valores de densidad a granel para pellets de madera de pino. Por ejemplo, se han reportado valores de 574 a 677 kg/m³ (Sher *et al.*, 2017) y de 690 kg/m³ (García *et al.*, 2018). En general, para pellets de madera Bala-Litwiniak y Radomiak (2019) encontraron una densidad de 590 kg/m³, mientras que Park *et al.* (2019) reportan un valor de 667 kg/m³ y Stolarski *et al.* (2022) dan a conocer un valor de 569 kg/m³. Solamente 17 de las 23 muestras de pellets aquí estudiados, cuya densidad a granel es superior a 600 kg/m³, cumplen con la recomendación de la norma DIN 51731 (1996). La densidad a granel es inherente a la densidad básica del material lignocelulósico, humedad y tamaño de partícula, así como de otros aspectos relacionados con el proceso de fabricación como la presión aplicada y la temperatura alcanzada durante el densificado, que juega un rol importante en el manejo de estos biocombustibles densificados, así como en el costo logístico (Michelena y Martín, 2008).

Tabla 2. Evaluación física de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica**Table 2.** Physical evaluation of pellets produced from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	D (mm)	L (mm)	P (g)	DP (g/cm ³)	DG (kg/m ³)
1	Quintana Roo	5.81 ± 0.02 ^f	20.44 ± 9.51 ^{cdef}	0.62 ± 0.31 ^{de}	1.14 ± 0.08 ^{fgh}	593 ± 8.59 ^d
2		5.90 ± 0.00 ^e	15.48 ± 4.62 ^{fgh}	0.52 ± 0.18 ^{ef}	1.21 ± 0.07 ^{bcd}	643 ± 3.67 ^l
3		5.90 ± 0.00 ^e	20.11 ± 8.35 ^{bcd}	0.73 ± 0.33 ^{abc}	1.32 ± 0.07 ^a	668 ± 10.30 ^m
4		5.92 ± 0.06 ^d	16.42 ± 6.22 ^{fgh}	0.53 ± 0.24 ^{efg}	1.15 ± 0.09 ^{efg}	573 ± 8.58 ^b
5	Chihuahua	5.92 ± 0.05 ^d	11.28 ± 2.67 ^{klm}	0.34 ± 0.09 ^{ij}	1.10 ± 0.06 ^{hi}	590 ± 6.67 ^{c,d}
6		5.93 ± 0.07 ^{cd}	10.47 ± 2.97 ^m	0.33 ± 0.11 ^j	1.12 ± 0.07 ^{ghi}	601 ± 3.06 ^{d,e}
7		5.90 ± 0.02 ^e	11.90 ± 2.68 ^{klm}	0.39 ± 0.09 ^{hij}	1.20 ± 0.08 ^{cd}	606 ± 4.23 ^{e,f}
8		5.90 ± 0.00 ^e	10.74 ± 1.99 ^{lm}	0.35 ± 0.07 ^{ij}	1.18 ± 0.07 ^{def}	618 ± 11.60 ^{f,g,h,i}
9	Michoacán	5.92 ± 0.09 ^{cd}	13.58 ± 2.51 ^{hij}	0.44 ± 0.09 ^{fgh}	1.16 ± 0.05 ^{efg}	630 ± 2.69 ^{i,j,k}
10		5.93 ± 0.09 ^c	17.58 ± 3.91 ^{bcde}	0.58 ± 0.12 ^{cd}	1.20 ± 0.04 ^{cde}	614 ± 5.26 ^{f,g,h}
11		6.00 ± 0.00 ^{ab}	12.22 ± 2.20 ^{ijkl}	0.40 ± 0.08 ^{hi}	1.14 ± 0.06 ^{gh}	622 ± 1.97 ^{h,i}
12		6.00 ± 0.00 ^{ab}	13.00 ± 3.16 ^{ijk}	0.43 ± 0.12 ^{gh}	1.15 ± 0.08 ^{fg}	609 ± 7.32 ^{e,f,g}
13		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.60 ± 5.79 ^{ghi}	0.54 ± 0.22 ^{ef}	1.21 ± 0.07 ^{bcd}	639 ± 2.69 ^{k,l}
14		6.00 ± 0.00 ^{ab}	26.29 ± 7.90 ^a	0.88 ± 0.27 ^a	1.18 ± 0.05 ^{def}	612 ± 7.82 ^{e,f,g}
15		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.73 ± 5.28 ^{fgh}	0.54 ± 0.19 ^{de}	1.20 ± 0.08 ^{bcd}	635 ± 3.56 ^{j,k,l}
16		6.08 ± 0.16 ^a	21.38 ± 6.08 ^{ab}	0.67 ± 0.22 ^{bc}	1.08 ± 0.06 ⁱ	532 ± 2.24 ^a
17		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.77 ± 4.16 ^{efgh}	0.51 ± 0.15 ^{de}	1.15 ± 0.05 ^{fg}	581 ± 2.66 ^{b,c}
18		6.00 ± 0.00 ^{ab}	16.73 ± 4.57 ^{defg}	0.58 ± 0.17 ^{cde}	1.21 ± 0.06 ^{bcd}	618 ± 5.97 ^{f,g,h}
19		6.00 ± 0.00 ^{ab}	21.14 ± 7.18 ^{abc}	0.75 ± 0.28 ^{ab}	1.25 ± 0.06 ^b	627 ± 16.37 ^{i,j,k}
20		6.00 ± 0.00 ^{ab}	25.46 ± 8.94 ^a	0.88 ± 0.33 ^{ab}	1.22 ± 0.05 ^{bc}	626 ± 14.07 ^{i,j}
21		6.00 ± 0.00 ^{ab}	11.67 ± 1.89 ^{klm}	0.39 ± 0.07 ^{hi}	1.19 ± 0.07 ^{cde}	590 ± 6.17 ^{c,d}
22	Oaxaca	5.92	11.35	0.38	1.21	613

	$\pm 0.08^{cd}$	$\pm 1.55^{klm}$	$\pm 0.05^{hij}$	$\pm 0.06^{bc}$	$\pm 5.22^{f,g,h}$
23	5.99	14.47	0.50	1.22	619
	$\pm 0.06^b$	$\pm 4.30^{hij}$	$\pm 0.16^{efg}$	$\pm 0.06^{bc}$	$\pm 8.54^{g,h,i}$

D = diámetro; L = longitud; P = peso; DP = diámetro de partícula; DG = densidad a granel. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

3.2 Evaluación mecánica de los pellets

El índice de resistencia al impacto varió de 100 a 215 % (Tabla 3), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Una investigación realizada en pellets de aserrín de pino da a conocer índices de 96.67 a 125 % (Núñez-Retana *et al.*, 2019), mientras que para maderas tropicales se encontraron valores de 177 a 160 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

Tabla 3. Evaluación mecánica de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica

Table 3. Mechanical evaluation of pellets made from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	IRI (%)	RC (N/mm)
1	Quintana Roo	100.00 ± 19.86^i	1542 ± 413.72^a
2		190.00 ± 75.39^{abc}	629 ± 133.05^{ab}
3		172.50 ± 67.81^{abcde}	861 ± 21.13^{ab}
4		133.75 ± 47.48^{fgh}	294 ± 30.51^{efg}
5	Chihuahua	176.25 ± 76.72^{abcde}	178 ± 9.54^i
6		166.25 ± 72.67^{cdefg}	220 ± 46.58^{ghi}
7		207.50 ± 78.26^{ab}	258 ± 29.74^{fgh}
8		182.50 ± 71.22^{abcd}	206 ± 21.73^{hi}
9	Michoacán	160.50 ± 76.39^{cdefg}	312 ± 77.16^{ef}
10		151.25 ± 56.47^{cdefg}	870 ± 170.99^{ab}
11		215.00 ± 79.63^a	208 ± 62.04^{ghi}
12		175.00 ± 76.95^{abcde}	293 ± 108.32^{efg}
13		168.75 ± 72.49^{abcde}	460 ± 19.50^{bc}
14	Durango	142.50 ± 43.75^{defg}	690 ± 33.00^{ab}
15		186.25 ± 79.25^{abcd}	301 ± 76.00^{efg}
16		167.50 ± 59.11^{abcde}	358 ± 6.56^{cde}
17		136.25 ± 61.49^{gh}	423 ± 35.25^{bcd}
18		115.00 ± 46.17^{hi}	334 ± 96.06^{def}
19		143.75 ± 59.53^{efg}	351 ± 10.53^{def}
20		147.50 ± 58.99^{defg}	509 ± 69.42^{bcd}
21		173.75 ± 78.42^{bcdef}	347 ± 29.46^{cdef}
22	Oaxaca	181.25 ± 83.06^{abcde}	222 ± 41.31^{ghi}
23		160.00 ± 75.39^{cdefg}	317 ± 70.95^{ef}

IRI = índice de resistencia al impacto; RC = resistencia a la compresión. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

Las diferencias podrían atribuirse a la densidad de las maderas (Michelena y Martín, 2008). Por los índices aquí encontrados, se puede afirmar que los pellets pueden considerarse de buena calidad, ya que la norma ASABE (2006) refiere que pellets con índice mayor a 97.5 % son considerados biocombustibles de alta calidad por su buena adhesión, lo que permitiría su buen manejo y transportación; al contrario, podría esperarse mal manejo por desintegración del material densificado (Michelena y Martín, 2008).

Los resultados de la resistencia a la compresión (Tabla 3) presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Además de la longitud, diámetro y densidad de partícula, la resistencia a la compresión es otro de los criterios relevantes en la caracterización técnico-funcional de los pellets (Sette *et al.*, 2018). Los resultados de la resistencia a la compresión variaron de 178 a 1542 N/mm, y para pellets de aserrín de pino se han encontrado valores de 537 a 786 N/mm, mientras que para pellets de aserrín de encino se han dado a conocer resultados que van de 1142 a 1792 N/mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Estas diferencias pudieran explicarse por el tiempo y temperatura alcanzados en el proceso de densificación de los materiales.

3.2 Evaluación energética de los pellets

El contenido de cenizas varió de 0.40 a 3.85 % con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) como se aprecia en la Tabla 4. El contenido de sustancias inorgánicas en los pellets de aserrín de pino es menor a 1.0 %, mientras que en los de encino y de maderas tropicales se encontraron valores mayores, lo que es consistente con estudios recientes (Carrillo-Parra *et al.*, 2018; Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). En pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales, se han reportado resultados de cenizas de 2.41 a 3.22 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2018) que son comparables con los aquí obtenidos. Tomando en consideración el esquema de certificación sobre la calidad de los pellets elaborados con madera, los aquí obtenidos, cuyo valor de contenido de cenizas sea ≤ 0.7 % podrían alcanzar la calidad A1, los de contenido ≤ 1.2 % serían calidad A2 y los de ≤ 2.0 % podrían ser calidad B (Manual ENplus, 2015), esto en caso de exportación de los pellets. Sin embargo, visualizando el consumo local y sobre todo el rural, los pellets obtenidos podrían ser usados y las cenizas obtenidas podrían tener aplicación en el compostaje de materiales lignocelulósicos, evaluando la presencia de elementos pesados y su toxicidad.

El material volátil de los pellets varió de 80.94 a 92.47 % (Tabla 4) con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En el caso de los pellets de maderas tropicales, los resultados variaron de 80.94 a 85.78 %, mayores a los reportados (72 – 79 %) para pellets de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Con relación a los pinos, el contenido de material volátil varió de 83.07 a 92.47 %, con cierta similitud a los resultados encontrados en pellets de aserrín de pino (83.9 – 85.21 %) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Se estima que un valor de 82.8 % de material volátil es adecuado para pellets con fines comerciales (Chen *et al.*, 2015), por lo que de acuerdo con los resultados aquí obtenidos prácticamente todos los pellets cumplen con este parámetro. El material volátil es importante por su relación con los gases liberados en su combustión y afectan su desempeño y estabilidad física (Forero-Núñez *et al.*, 2015), siendo además un parámetro que se puede disminuir con un proceso de pirólisis controlado (Ruiz-Aquino *et al.*, 2019).

Tabla 4. Evaluación energética de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica**Table 4.** Energy evaluation of pellets produced from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	CE (%)	MV (%)	CF (%)	PC (MJ/kg)	DE (GJ/m ³)
1	Quintana Roo	2.18	81.86	15.96	17.68	10.48
		± 0.16 ^{abc}	± 0.94 ^h	± 0.81 ^a	± 0.46 ^{fghi}	± 0.41 ^{fghi}
2		3.85	80.94	15.21	16.84	10.84
		± 0.01 ^a	± 2.02 ^h	± 2.01 ^a	± 2.43 ^{ghij}	± 1.60 ^{efgh}
3		2.84	85.78	11.38	16.79	11.21
		± 0.25 ^{ab}	± 0.15 ^{fgh}	± 0.09 ^{abcd}	± 0.82 ^{ghij}	± 0.49 ^{defg}
4		2.73	85.39	11.88	16.25	9.32
		± 0.04 ^{ab}	± 1.05 ^{fgh}	± 1.02 ^{abc}	± 0.20 ^{ij}	± 0.18 ^k
5	Chihuahua	0.57	90.56	8.87	15.90	9.38
		± 0.26 ^{hij}	± 0.33 ^{ab}	± 0.59 ^{efgh}	± 0.43 ^{ij}	± 0.25 ^k
6		0.54	89.72	9.74	15.83	9.51
		± 0.13 ^{ij}	± 1.24 ^{abcd}	± 1.18 ^{cdef}	± 0.60 ⁱ	± 0.36 ^{ijk}
7		0.55	86.28	13.16	15.59	9.45
		± 0.13 ^{ij}	± 0.58 ^{efgh}	± 0.48	± 0.87 ⁱ	± 0.47 ^{jk}
8		0.62	83.07	16.31	19.38	11.98
		± 0.06 ^{ghi}	± 10.15 ^{defg}	± 1.19 ^{abc}	± 0.47 ^{abcde}	± 0.31 ^{abcd}
9	Michoacán	0.75	85.77	11.81	18.47	11.62
		± 0.06 ^{efg}	± 0.19 ^{fgh}	± 1.41 ^{abcd}	± 0.50 ^{cdefg}	± 0.35 ^{def}
10		0.40	90.67	8.93	19.78	12.14
		± 0.08 ⁱ	± 1.16 ^{ab}	± 1.13 ^{efgh}	± 0.99 ^{abcd}	± 0.70 ^{abcd}
11		0.56	89.91	9.54	18.81	11.70
		± 0.06 ^{ij}	± 1.17 ^{abc}	± 1.22 ^{defgh}	± 1.39 ^{cdef}	± 0.88 ^{de}
12		0.54	85.29	14.16	19.39	11.81
		± 0.09 ^{ij}	± 0.92 ^{gh}	± 1.00 ^{ab}	± 0.44 ^{bcde}	± 0.29 ^{bcde}
13		0.67	89.05	10.29	18.40	11.75
		± 0.06 ^{fgh}	± 1.26 ^{bcd}	± 1.20 ^{cdef}	± 0.55 ^{defg}	± 0.31 ^{bcde}
14	Durango	0.56	92.47	6.97	19.05	11.66
		± 0.03 ^{ij}	± 1.05 ^a	± 1.05 ^h	± 0.13 ^{bcdef}	± 0.21 ^{cde}
15		0.63	89.66	9.71	19.84	12.61
		± 0.05 ^{ghi}	± 0.82 ^{abcd}	± 0.77 ^{cdefg}	± 0.70 ^{abcd}	± 0.39 ^{ab}
16		0.90	88.95	10.15	19.53	10.39
		± 0.09 ^{cde}	± 1.16 ^{bcde}	± 1.24 ^{cdef}	± 0.48 ^{acbd}	± 0.29 ^{ghij}
17		2.65	88.32	9.02	19.75	11.47
		± 0.04 ^{ab}	± 1.09 ^{bcdefg}	± 1.07 ^{efgh}	± 0.16 ^{abc}	± 0.10 ^{defg}
18		0.82	91.96	7.22	20.36	12.58
		± 0.17 ^{ef}	± 0.84 ^a	± 0.80 ^{gh}	± 0.69 ^{ab}	± 0.53 ^{abc}
19		0.57	89.72	9.71	20.85	13.07
		± 0.02 ^{ij}	± 5.96 ^{bcdef}	± 1.95 ^{bcde}	± 0.21 ^a	± 0.46 ^a
20		1.22	89.13	9.66	18.09	11.31
		± 0.09 ^{bcd}	± 1.21 ^{bcde}	± 1.14 ^{cdef}	± 2.22 ^{efgh}	± 1.16 ^{defg}
21		0.83	90.65	8.52	16.32	9.64
		± 0.14 ^{def}	± 1.35 ^{ab}	± 1.50 ^{fgh}	± 0.74 ^{hij}	± 0.52 ^{ijk}
22	Oaxaca	0.85	88.38	10.45	16.73	10.26

	$\pm 0.13^{\text{def}}$	$\pm 0.95^{\text{bcdefg}}$	$\pm 0.82^{\text{cdef}}$	$\pm 0.33^{\text{ghij}}$	$\pm 0.20^{\text{ghijk}}$
23	1.20	87.95	10.84	15.42	9.56
	$\pm 0.06^{\text{bcd}}$	$\pm 4.00^{\text{cdefg}}$	$\pm 1.94^{\text{bcde}}$	$\pm 1.72^{\text{ij}}$	$\pm 1.18^{\text{hijk}}$

CE = cenizas; MV = material volátil; CF = carbono fijo; PC = poder calorífico; DE = densidad energética. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

El carbono fijo varió de 6.97 a 16.31 % con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Estos valores corresponden precisamente a las muestras de pellets elaborados con aserrín de pino (Tabla 4). Para los pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales, los valores variaron de 11.38 a 15.96 % (Tabla 4), y prácticamente se ubican en el rango reportado para pellets elaborados con aserrín de algunas especies tropicales (12 – 21 %) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Se han dado a conocer valores que van de 14.39 a 15.62 % en pellets de pino y de 15.15 a 17.37 % en pellets de encino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Estos últimos valores son mayores a los aquí encontrados en las muestras de pellets de encino. En conocido que este parámetro tiene singular importancia en el proceso de combustión promoviendo mayor generación térmica cuanto más alto es el contenido de carbono fijo (Onochie *et al.*, 2017).

El poder calorífico superior (Tabla 4), presenta diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), variando de 15.42 a 20.85 MJ/kg. En cuanto a las muestras de maderas tropicales, los resultados son ligeramente inferiores a los datos encontrados en pellets de aserrín de algunas maderas tropicales (17.8 – 19.64 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Con respecto a pellets de pino, se han publicado valores de 20.69 a 20.91 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Los valores aquí encontrados en los pellets de encino se ubican ligeramente por debajo de algunos datos reportados para pellets de aserrín de encino (19.98 – 20.38 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). El poder calorífico constituye un parámetro obligatorio ha determinar al margen de la materia prima o vía de obtención del biocombustible (Pinilla *et al.*, 2022). Es de suma importancia en biocombustibles densificados y pellets con poder calorífico superior a 16.5 MJ/kg sugerido por la norma ISO 17225-2 (2021), por lo que pudieran sugerirse para uso residencial o industrial.

La densidad energética de los pellets varió de 9.32 a 13.07 GJ/m³ con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), como se aprecia en la Tabla 4. En el caso de las maderas tropicales, los resultados variaron de 9.32 a 11.21 GJ/m³; para los pellets de pino, de 9.38 a 12.61 GJ/m³; y para los de encino, los valores fueron cercanos entre sí (11.31 – 11.47 GJ/m³). La mayor proporción de los hallazgos registrados en esta parte se encuentran por debajo del límite inferior (12.0 – 14.5 GJ/m³) que ha sido reportado para pellets de pino (Peng *et al.*, 2015; García *et al.*, 2018).

4. Conclusiones

Usando aserrín de 23 especies de maderas colectado en el proceso de aserrío en cinco estados de la República Mexicana se elaboraron pellets y se llevó a cabo su evaluación física, mecánica y energética. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las evaluaciones realizadas. La humedad de los pellets fue menor al valor recomendado, por lo que se esperaría buena combustión. Respecto a la densidad de partícula obtenida, los pellets son considerados de buena calidad. Aproximadamente el 74 % de los pellets presentan una densidad superior a 600 kg/m³, valor

sugerido por la norma DIN. De acuerdo a la evaluación mecánica, los pellets pueden ser considerados de buena calidad. Solamente el 21 % de las muestras de pellets presentan un contenido de cenizas superior a 2.0 %, por lo que resto de ellos pudiera alcanzar al menos la clasificación B, de acuerdo al Manual ENplus. Por los resultados de material volátil, los pellets pueden considerarse aptos para uso comercial. Se encontró que el 74 % de los pellets tiene un poder calorífico mayor a 16.5 MJ/kg, recomendado por la norma ISO. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, los pellets pudieran tener aplicación local, y podrían promover la disminución de la degradación medioambiental e impactar en la gestión sostenible de los recursos o biomasa lignocelulósica localmente.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización, J.G.R.Q.; investigación, M.A.R.R.; recursos, J.G.R.Q., A.C.P., F.R.A., C.L.A., J.J.H.S., y N.C.A.; redacción-redacción del borrador original, M.A.R.R., A.C.P. y J.G.R.Q.; redacción-revisión y edición, J.G.R.Q., F.R.A. y L.F.P.I.; visualización, J.G.R.Q., L.F.P.I., F.R.A., J.J.H.S., C.L.A. y N.C.A.; supervisión, J.G.R.Q.; administración del proyecto, J.G.R.Q.; obtención de financiación, J.G.R.Q. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a SENER-CONACYT (proyecto: FSE-SENER-2014-246911), a ejidos y empresas forestales por la donación del material lignocelulósico, así como a Axel Correa Ranguel por el apoyo en la preparación de los materiales densificados.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener algún tipo de conflicto de interés.

Nomenclatura

N	Newton
MJ	Megajoules
GJ	Gigajoules
kN	kilonewton
D	Diámetro
L	Longitud
P	Peso
DP	Densidad de partícula
DG	Densidad a granel
IRI	Índice de resistencia al impacto
RC	Resistencia a la compresión
CE	Contenido de ceniza

MV	Material volátil
CF	Carbono fijo
PC	Poder calorífico
DE	Densidad energética

5. Referencias

- Acampora, A., Civitarese, V., Sperandio, G., & Rezaei, N. (2021). Qualitative Characterization of the Pellet Obtained from Hazelnut and Olive Tree Pruning. *Energies* 14(14): 4083. <https://doi.org/10.3390/en14144083>
- Adebayo, T.S., Awosusi, A.A., Kirikkaleli, D., Akinsola, G.D., & Mwamba, M.N. (2021). Can CO₂ emissions and energy consumption determine the economic performance of South Korea? A time series analysis. *Environ Sci Pollut Res* 28: 38969–38984. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13498-1>
- Aguilar-Sánchez, P., Carrillo-Ávila, N., Carrillo-Parra, A., Pérez-Martínez, A., & Núñez- Retana, V.D. (2022). Evaluación de los parámetros de producción de pellets de *Pinus patula* para una estandarización de calidad en México. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad* 1(1): 158–164. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.166>
- Amador-Hernández, J.C. (2015). Ley de Transición Energética. Dirección General de Difusión y Publicaciones, México. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/2315>
- ASABE Standards. (2006). S269.4: Cubes, pellets and crumbles definitions and methods for determining density, durability and moisture content. St. Joseph: *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- ASTM D143. (2007). Standard methods of testing small specimens of timber. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM D2166–85. (2008). Standard test method of compressive strength of wood. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM D440–68. (2007). Standard test method of drop shatter test for coal. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM E872–82. (2013). Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- Bala-Litwiniak, A., & Radomiak, H. (2019). Possibility of the Utilization of Waste Glycerol as an Addition to Wood Pellets. *Waste and Biomass Valorization* 10: 2193–2199. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0260-7>
- Bandara, J.C., Jaiswal, R., Nielsen, H.K., Moldestad, B.M.E., & Eikeland, M.S. (2021) Air gasification of wood chips, wood pellets and grass pellets in a bubbling fluidized bed reactor. *Energy* 233: 121149. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121149>
- Baasch, S. (2021). Energy transition with biomass residues and waste: Regional-scale potential and conflicts. A case study from North Hesse, Germany. *J. Environ. Policy Plan.* 23(2): 243–255. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1888701>

- Carrillo-Parra, A., Ngangyo-Heya, M., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch, R., Rutiaga-Quñones, J.G., & Correa-Méndez, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *PeerJ* 6: e5504. <https://doi.org/10.7717/peerj.5504>
- Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J.G., Ríos-Saucedo, J.C., Ruiz-García, V.M., Ngangyo-Heya, M., Nava-Berúmen, C.A., & Núñez-Retana, V.D. (2021). Quality of Pellet Made from Agricultural and Forestry Waste in Mexico. *BioEnergy Research* 15, 977–986. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10327-8>
- Chávez-Rosales, J.S., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Lujan-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). Basic chemical composition of *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources* 16(1): 816-824. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.816-824>
- Chen, W.H., Peng, J., & Bi, X.T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 847-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- DIN 51731. (1996). Testing of solid fuels – Compressed untreated wood, requirements and testing. Deutsches Institut für Normung. Berlin.
- EN 18134–3. (2015). Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- EN ISO 17828. (2015). Biocombustibles Sólidos. Determinación de la Densidad a Granel. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- Forero-Núñez, C.A., Jochum, J., & Sierra, F.E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación* 35(1): 17–23. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>
- García, C.A., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2016). Introducción. In: García-Bustamante, C.A., Masera, O. (Eds.) Estado del Arte de la Bioenergía en México. *Red Temática de Bioenergía (RTB) del CONACYT* (pp. 9–14). Imagia Comunicación: Guadalajara, Mexico.
- García, D.P., Caraschi, J.C., Ventorim, G., Viera, F.H.A., & Protásio, T.P. (2018). Comparative Energy Properties of Torrefied Pellets in Relation to Pine and Elephant Grass Pellets. *BioResources* 13(2): 2898-2906. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.13.2.2898-2906>
- Gutiérrez-Acosta, J.M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J.J., Ruiz-Aquino, F., Navarrete-García, M.A., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). On the Basic Chemical Composition of Selected Biomass Types from Four Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources* 16(3): 5694-5705. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.3.5694-5705>
- Hansen, M.T., Jain, A.R., Hayes, S., & Bateman, P. (2009). English handbook for wood pellet combustion. EUBIA - European Biomass Industry Association.
- Hiloidhari, M., Baruah, D.C., Kumaria, M., Kumari, S., & Thakur, I.S. (2019). Prospect and potential of biomass power to mitigate climate change: A case study in India. *Journal of Cleaner Production* 220: 931-944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.194>

- Ilari, A., Foppa Pedretti, E., De Francesco, C., & Duca, D. (2021). Pellet Production from Residual Biomass of Greenery Maintenance in a Small-Scale Company to Improve Sustainability. *Resources* 10(12): 122. <https://doi.org/10.3390/resources10120122>
- ISO 17225–2. (2021). Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets.
- Kocer, A., & Kurklu, A. (2020). Production of pellets from pruning residues and determination of pelleting physical properties. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Ef* 44(4): 10346-10358. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1752857>
- Manual ENplus. (2015). Esquema de certificación de calidad para pellets de madera. Parte 3: Requisitos de calidad de los pellets. European Pellet Council (EPC). Bruselas, Bélgica. <https://goo.su/7uSfn>
- Michelena, M.C., & Martín, F.M. (2008). *Los Biocombustibles*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V.M., López-Sosa, L.B., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2020). Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp. for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Appl. Sci.*10(8): 2933. <https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Morales-Máximo, M., Rutiaga-Quñones, J.G., Masera, O., & Ruiz-García, V.M. (2022). Briquettes from *Pinus* spp. Residues: Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies* 15(9): 3419. <https://doi.org/10.3390/en15093419>
- Moran, P., Goggins, J., & Hajdukiewicz, M. (2017). Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate. *Energy and Buildings* 139: 590–607. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.029>
- Mostafa, M., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105: 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>
- Núñez-Retana, V.D., Escobedo-Bretado, M.Á., Quiñones-Reveles, M, Ruíz-Aquino, F., & Carrillo-Parra, A. (2019). Efecto del contenido de humedad sobre pélets de aserrín de madera de *Pinus* spp. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 6(2): 136-144. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/121>
- Nwabueze, Q.A., & Leggett, S. (2024). Advancements in the Application of CO₂ Capture and Utilization Technologies—A Comprehensive Review. *Fuels* 5(3): 508-532. <https://doi.org/10.3390/fuels5030028>
- Onochie, U.P., Obanor, A.I., Aliu, S.A., & Igbodaro, O.O. (2017). Proximate and ultimate analysis of fuel pellets from oil palm residues. *Niger J Technol* 36(3): 987–990. <https://doi.org/10.4314/njt.v36i3.44>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., & Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146: 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>

- Peng, J., Wang, J., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S., Peng, H., & Jia, D. (2015). Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Process. Technol.* 129: 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.010>
- Park, S., Kim, S.J., Oh, K.Ch., Cho, L., Kim, M.J., Jeong, I.S., Lee, Ch.G., & Kim, D. (2019). Investigation of agro-byproduct pellet properties and improvement in pellet quality through mixing, *Energy* 190: 116380. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116380>
- Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N. A. B. D., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., & Haruna, K. (2019). Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. *IEEE Access* 7: 63837–63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>
- Pinilla, J.C., Luengo K., Lobo, F., Navarrete, M., & Navarrete, F. (2022). Comparación de la normativa nacional y europea para la producción de pellet de madera. *Ciencia & Investigación Forestal* 28(1): 73-79. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.561>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J.J., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2022). Evaluation of selected physical and thermal properties of briquette hardwood biomass biofuel. *BioEnergy Research* 15: 1407-1414. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico. *BioResources* 16(2): 2249-2263. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.2.2249-2263>
- Rennkamp, B., Haunss, S., Wongsu, K., Ortega, A., & Casamadrid, E. (2017). Competing coalitions: The politics of renewable energy and fossil fuels in Mexico, South Africa and Thailand. *Energy Research & Social Science* 34: 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.07.012>
- Rutiaga-Quñones, J.G., Pintor-Ibarra, L.F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M.A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J.R., Hernández-Solís, J.J., & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources* 15(4): 8529-8553. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Santiago-García, W., Fuente-Carrasco, M.E., Sotomayor-Castellanos, J. R., & Carrillo-Parra, A. (2019). Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico. *Wood Res.* 64(1): 71-82. <https://goo.su/4c5wbn>
- Sette, C.R.Jr., Santiago-Hansted, A.L., Novaes, E., Fonseca-e-Lima, P.A., Rodrigues-de-Souza-Santos, A., & Minoru-Yamaji, F. (2018). Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Ind Crops Prod* 122: 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>
- Sgarbossa, A., Costa, C., Menesatti, P., Antonucci, F., Pallotino, F., Zanetti, M., Grigolato, S., & Cavalli, R. (2015). A multivariate SIMCA index as discriminant in wood pellet quality assessment. *Renewable Energy* 76: 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.041>
- Sher, F., Pans, M.A., Afilaka, D.T., Sun, Ch., & Liu, H. (2017). Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidised bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. *Energy* 141: 2069-2080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.118>

- Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., & Olba-Zięty, E. (2022). Cascaded use of perennial industrial crop biomass: The effect of biomass type and pre-treatment method on pellet properties. *Industrial Crops and Products* 185: 115104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115104>
- Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A.S., & Ofozor, C. A. (2020). Does wood biomass energy use reduce CO₂ emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members. *Journal of Cleaner Production* 253: 119996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119996>
- Thek, G., & Obernberger, I. (2012). The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets. Abingdon: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- EN 14961–2. (2012). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. <https://goo.su/Kd0Tp>
- UNE EN 14961–6. (2012). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 6: Pélets no leñosos para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. <https://goo.su/rD1Ub>
- UNE-EN 14918. (2011). Determinación del poder calorífico. Norma Europea, CEN Comité Europeo para Estandarización. Madrid, España. <https://goo.su/Juu2>
- UNE-EN ISO 18122. (2023). Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de ceniza. Estándar Europeo, CEN Comité Europeo para Estandarización. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0071397>
- Velázquez-Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. *Editorial Reverté*.
- Wang, C., Chang, Y., Zhang, L., Pang, M., & Hao, Y. (2017). A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China. *Energy* 120: 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.085>
- Yuping, L., Ramzan, M., Xincheng, L., Murshed, M., Awosusi, A.A., BAH, S.I., & Adebayo, T.S. (2021). Determinants of carbon emissions in Argentina: The roles of renewable energy consumption and globalization. *Energy Reports* 7: 4747-4760. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.065>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Composición química y actividad antioxidante en estambres de cuatro especies de *Cylindropuntia*: influencia del solvente de extracción

Chemical Composition and Antioxidant Activity of Stamens from Four *Cylindropuntia* Species: Influence of the Extraction Solvent

Kevin Alexis Madrigal Hernández¹, Raquel González-Fernández¹, José Valero-Galván^{1*}

¹ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Av. Plutarco Elías Calles #1210 FOVISSSTE Chamizal, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C.P. 32310.

*Correspondencia: jose.valero@uach.mx (José Valero-Galván)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1802>

Recibido: 27 de diciembre de 2024; Aceptado: 21 de mayo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. René Renato Balandrán-Quintana

Resumen

Actualmente, la información sobre la composición química de las especies del género *Cylindropuntia* es limitada. Generar mayor conocimiento sobre estas especies es de interés para identificar diferencias entre especies y determinar su potencial antioxidante y composición química. El objetivo de este estudio fue evaluar la composición química y la actividad antioxidante de los estambres de cuatro especies de *Cylindropuntia*, utilizando tres solventes acuosos para la extracción y la cuantificación espectrofotométrica de pigmentos, compuestos fenólicos, flavonoides, azúcares reductores y actividad antioxidante. El metanol fue el solvente más eficiente en la extracción de clorofilas (b, c, d y total), carotenoides, betacianinas, betaxantinas y betalainas, en comparación con la acetona y el etanol. *C. spinosior* presentó las mayores concentraciones de xantofilas (29.37 mg·g⁻¹), betacianinas (0.190 mg·g⁻¹), betaxantinas (0.080 mg·g⁻¹) y betalainas (0.27 mg·g⁻¹), mientras *C. imbricata* destacó por su alto contenido de clorofila a (49.51 mg·g⁻¹), clorofila d (15.24 mg·g⁻¹), clorofila total (89.10 mg·g⁻¹), compuestos fenólicos (10.97 mg EAG·g⁻¹) y una mayor actividad antioxidante medida por FRAP (22.56 mmol ET·g⁻¹). Por otro lado, *C. kleiniae* presentó la mayor concentración de carotenoides (12.14 mg·g⁻¹), azúcares reductores (136.89 mg EG·g⁻¹) y actividad antioxidante medida por DPPH (23.84 μM ET·g⁻¹). En contraste, *C. arbuscula* presentó los niveles más bajos en la mayoría de los compuestos analizados. Los estambres de las especies *C. spinosior* y *C. imbricata*

emergen como fuentes potenciales de compuestos bioactivos, lo que resalta su relevancia para futuras investigaciones en el ámbito fitoquímico, farmacológico y nutricional.

Palabras clave: cactáceas, pigmentos vegetales, antioxidantes naturales, flavonoides y fenoles, análisis discriminante.

Abstract

Currently, information on the chemical composition of species within the *Cylindropuntia* genus is limited. Expanding knowledge about these species is essential for identifying interspecies differences and determining their antioxidant potential and chemical composition. This study aimed to evaluate the chemical composition and antioxidant activity of stamens from four *Cylindropuntia* species using three aqueous solvents for extraction and spectrophotometric quantification of pigments, phenolic compounds, flavonoids, reducing sugars, and antioxidant activity. Among the solvents tested, methanol was the most efficient for extracting chlorophylls (b, c, d, and total), carotenoids, betacyanins, betaxanthins, and betalains, compared to acetone and ethanol. *C. spinosior* exhibited the highest concentrations of xanthophylls ($29.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), betacyanins ($0.190 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), betaxanthins ($0.080 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), and betalains ($0.27 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), while *C. imbricata* stood out for its high content of chlorophyll a ($49.51 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), chlorophyll d ($15.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), total chlorophyll ($89.10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), phenolic compounds ($10.97 \text{ mg GAE}\cdot\text{g}^{-1}$), and potent antioxidant activity measured by FRAP ($22.56 \text{ mmol TE}\cdot\text{g}^{-1}$). On the other hand, *C. kleiniae* exhibited the highest concentration of carotenoids ($12.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), reducing sugars ($136.89 \text{ mg EG}\cdot\text{g}^{-1}$), and a higher antioxidant activity measured by DPPH ($23.84 \text{ mmol TE}\cdot\text{g}^{-1}$). In contrast, *C. arbuscula* showed the lowest levels across most analyzed compounds. The stamens of *C. spinosior* and *C. imbricata* emerge as promising sources of bioactive compounds, underscoring their relevance for future research in phytochemistry, pharmacology, and nutrition.

Keywords: cacti, plant pigments, natural antioxidants, flavonoids and phenols, discriminant analysis.

1. Introducción

Las cactáceas son plantas suculentas y dicotiledóneas pertenecientes al orden *Caryophyllales* (Jiménez-Sierra, 2011). Destacan por su adaptación a ambientes áridos y semiáridos, resultado de su naturaleza halófila y xerófila, así como de su metabolismo fotosintético C4 o CAM (Santos-Díaz y Camarena-Rangel, 2019). Dentro de la familia *Cactaceae* se han identificado entre 110 y 124 géneros, que en conjunto comprenden alrededor de 1500 a 1600 especies (de Castro Campos Pinto y Scio, 2014). Su distribución abarca todo el continente americano, con su mayor diversidad concentrada en Norteamérica, especialmente en los desiertos de Chihuahua, Sonora y Mojave (Fontenele *et al.*, 2021). En menor medida, también se encuentran en Argentina, Bolivia, Chile, Perú y Brasil (Ortega-Baes y Godínez-Álvarez, 2006).

En México, las cactáceas tienen un gran valor económico, social, cultural y ecológico, por lo que se utilizan en diversos ámbitos, como la alimentación, la producción de forraje, la delimitación de terrenos mediante cercos vivos, la ornamentación, las ceremonias religiosas y la medicina

tradicional. Sin embargo, estas especies han sufrido una disminución en sus poblaciones debido a la recolección y el comercio ilegal, así como al cambio de uso de suelo y la industrialización de sus hábitats naturales (Jiménez-Sierra, 2011).

El género *Cylindropuntia*, conocido coloquialmente como “choyas”, pertenece a la subfamilia *Opuntioideae* y se caracteriza por sus tallos cilíndricos, articulados y glabros, con areolas que contienen gloquidios y espinas. Sus flores pueden presentarse solitarias o agrupadas, con podarios en el pericarpelo (Balandrán-Quintana *et al.*, 2018; Malusa *et al.*, 2014). Con un registro de 35 especies, 21 subespecies y 10 híbridos, este género exhibe una amplia distribución geográfica que abarca el sur y centro de los Estados Unidos, el norte de México, así como Sudamérica, con presencia destacada en Chile, Ecuador y Perú (Hunt, 2016; Guzmán *et al.*, 2003). En México, las especies más abundantes incluyen *C. imbricata*, *C. leptocaulis*, *C. spinosior* y *C. kleiniae* (Guzmán *et al.*, 2003). Estas plantas se emplean como cercos vivos para delimitar terrenos y sus cladodios secos en la elaboración de artesanías (Bustamante y Burquez, 2005).

Desde el punto de vista fitoquímico, se ha reportado que las raíces de *C. cholla* presentan actividad antimicrobiana atribuida a inhibidores enzimáticos (Galván-Gutiérrez, 2019), mientras que los frutos y semillas contienen una elevada actividad antioxidante, asociada con su alto contenido de compuestos fenólicos (Reyes-Corral *et al.*, 2022). No obstante, existe información limitada sobre la composición fitoquímica y la actividad antioxidante de los estambres en el género *Cylindropuntia*. Dado que los pigmentos y metabolitos secundarios en estructuras florales pueden desempeñar un papel determinante en la defensa antioxidante, su análisis en el género *Cylindropuntia* representa una oportunidad para ampliar el conocimiento sobre los compuestos bioactivos de las flores en este género.

En la última década, ha crecido el interés por identificar fuentes naturales de compuestos bioactivos con capacidad antioxidante, debido a su potencial para mitigar el daño celular provocado por especies reactivas del oxígeno y radicales libres, factores vinculados a enfermedades crónicas (Hoang y Kim, 2021; Grodzicki y Dziendzikowska, 2020; Chandrasekara y Shahidi, 2018; Rangel-Huerta *et al.*, 2015). Dentro de la familia *Cactaceae*, diversas especies destacan por su riqueza en pigmentos, compuestos fenólicos, carotenoides, betalainas, fibras y mucílagos, que les confieren una notable capacidad antioxidante y protección frente al estrés ambiental (Márquez-Rangel *et al.*, 2025; Agostini-Costa, 2022; Aispuro-Hernández *et al.*, 2022; Das *et al.*, 2021). La variabilidad en la composición química entre diferentes tejidos y especies responde a factores ecológicos y evolutivos (Agostini-Costa, 2022), lo que subraya su relevancia en la ecología de ecosistemas áridos y su potencial en aplicaciones farmacológicas y nutraceuticas. Investigaciones recientes han destacado sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas (Martínez *et al.*, 2024; Das *et al.*, 2021; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020), reforzando el interés en los recursos naturales como alternativa sostenible a los antioxidantes sintéticos, cuyo impacto en la seguridad y efectos secundarios sigue en evaluación.

La extracción de compuestos bioactivos es relevante en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética (Martínez *et al.*, 2024; Das *et al.*, 2021; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020). Su eficacia depende en gran medida del solvente utilizado, cuya capacidad para disolver y extraer los compuestos de interés varía según sus características químicas (Ngo *et al.*, 2017; Nagarajan *et al.*, 2016). Propiedades como la polaridad, el punto de ebullición y la capacidad de solubilización determinan la cantidad y calidad de los compuestos obtenidos (Ngo *et al.*, 2017; Nagarajan *et al.*, 2016). Así, la elección adecuada del solvente maximiza el rendimiento de extracción, ya que los solventes polares favorecen

la extracción de compuestos hidrofílicos, mientras que los solventes menos polares son más eficaces en la extracción de compuestos lipofílicos (Ngo *et al.*, 2017; Nagarajan *et al.*, 2016; Arvayo-Enríquez *et al.*, 2013; Ritchie, 2008; Lichtenthaler, 1987).

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la composición química y la actividad antioxidante de los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*, mediante la extracción con tres solventes acuosos y la cuantificación espectrofotométrica de pigmentos, compuestos fenólicos, flavonoides, azúcares reductores y actividad antioxidante. Asimismo, se buscó identificar diferencias entre especies y determinar la combinación de solvente y especie con el mayor contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante, con el fin de aportar información relevante sobre su potencial fitoquímico, funcional y relevancia industrial por su uso como colorantes naturales.

2. Materiales y métodos

Material biológico y sitio de recolección

En el presente estudio se utilizó un diseño factorial para evaluar el efecto de tres solventes acuosos (metanol al 80 %, etanol al 80 % y acetona al 80 %, v/v) y la variación interespecífica en la extracción de pigmentos, compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante en estambres, los cuales incluyeron los filamentos y las anteras que contienen el polen, de cuatro especies del género *Cylindropuntia*.

La recolección de las flores se realizó a inicios de abril de 2023 en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, en especies nativas de la región. Para la identificación taxonómica, se seleccionaron aleatoriamente cinco individuos por especie y se recolectaron tres tallos y frutos de cada uno, siguiendo la guía de Deltoro-Torró *et al.* (2014).

Las flores de *C. kleiniae* y *C. imbricata* se recolectaron en el Parque Central Hermanos Escobar (31.687157, -106.427388), las de *C. spinosior* en el jardín botánico del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (31.746881, -106.442465), y las de *C. arbuscula* en el Parque Jardín del Valle (31.661430, -106.370235).

El protocolo de recolección se adaptó de González-Fernández *et al.* (2023), monitoreando cada 10 días entre el 1 de marzo y el 30 de mayo de 2023. Se seleccionaron dos flores al azar por individuo, sumando un total de diez flores por especie. Para evitar la contaminación del polen por insectos herbívoros y polinizadores, la colecta se realizó en antesis temprana. La recolección se llevó a cabo en diferentes ramas del mismo individuo, entre las 7:00 y 10:00 h.

Las muestras se depositaron individualmente en bolsas de polietileno herméticas sin solución fijadora, ya que en colectas previas se observó que las flores pueden abrirse tras el corte sin alteraciones en sus rasgos polínicos. Una hora después de la recolección, las muestras fueron transportadas al laboratorio, donde se cortaron longitudinalmente con un bisturí para separar los estambres. Posteriormente, las muestras se homogeneizaron en un mortero y se sometieron a un secado a 28 °C durante 96 h en una incubadora (Thermo, Alemania). Finalmente, el material seco fue pulverizado manualmente con un pistilo, colocado en sobres de papel identificados y almacenado a 27 °C por un máximo de 24 h antes de su análisis.

Preparación de los extractos

Para cada especie, se prepararon tres extractos estándar utilizando la técnica de extracción sólido-líquido con tres solventes acuosos al 80 % (v/v): metanol (Deq, México), etanol (Civeq, México) y acetona (Deq, México). La extracción se llevó a cabo siguiendo la metodología de Reyes-Corral *et al.* (2022).

Se pesaron 0.03 g de material seco de cada especie y se colocaron en un mortero. Posteriormente, se añadieron 1.5 mL de la solución de metanol al 80 % (v/v) y se homogeneizó con un pistilo hasta obtener una mezcla uniforme. La solución resultante se transfirió a tubos nuevos de 1.5 mL y se mantuvo a 4 °C durante 12 h en oscuridad. Luego, los extractos fueron centrifugados a 5000 rpm durante 3 min a 4 °C en una centrífuga (Eppendorf, Estados Unidos). El sobrenadante se recuperó y se almacenó a 4 °C hasta su análisis.

Este procedimiento se repitió utilizando soluciones acuosas de etanol al 80 % (v/v) y acetona al 80 % (v/v), asegurando condiciones idénticas para cada solvente.

Cuantificación de pigmentos

Se tomaron 75 µL de cada uno de los doce extractos y, por triplicado, se depositaron en celdas independientes dentro de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). Se midió la absorbancia de la longitud de onda a 470 nm, 490 nm, 547 nm, 630 nm, 632 nm, 647 nm, 652 nm, 649 nm, 664 nm, 665 nm, 691 nm y 696 nm en un espectrofotómetro acoplado a un lector de microplacas (Hercules®, USA) usando el programa Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Como blancos, se usaron los mismos solventes usados en la extracción. Para la cuantificación de clorofilas (a, b, c, d y total), xantofilas y carotenoides, se aplicaron las ecuaciones de Ritchie (2008) y Lichtenthaler (1987). La cuantificación de betacianinas, betaxantinas y betalainas totales se realizó mediante las ecuaciones propuestas por Castellanos-Santiago y Yahia (2008).

Cuantificación de fenólicos

El contenido total de compuestos fenólicos y flavonoides se cuantificó mediante el método de Folin-Ciocalteu y el método de cloruro de aluminio, respectivamente, con modificaciones (Valero-Galván *et al.* 2024; Georgé *et al.* 2005).

Para la cuantificación de compuestos fenólicos, 25 µL de cada uno de los doce extractos, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). A cada extracto se le añadieron 40 µL de Na₂CO₃ al 7.5 % (m/v) (Sigma-Aldrich, México) y 125 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu 2 N (Sigma-Aldrich, México). Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. La mezcla se incubó durante 15 min a 25 °C en oscuridad y se midió la absorbancia a 710 nm en un espectrofotómetro (Hercules, USA) acoplado al software Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Para la cuantificación de flavonoides, 62.5 µL de cada uno de los doce extractos estándar, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning,

México). A cada extracto se le añadieron 46.5 μL de NaNO_2 al 5 % (m/v) (Sigma-Aldrich, México), 46.5 μL de AlCl_3 al 10 % (m/v) (Sigma-Aldrich, México) y 62.5 μL de NaOH 0.5 M (Sigma-Aldrich, México). Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. Las mezclas se incubaron durante 15 min a 25 °C en oscuridad y se midió la absorbancia a 510 nm bajo las mismas condiciones descritas anteriormente.

Para la expresión de los resultados ambos análisis, se realizaron curvas de calibración. En el caso de los compuestos fenólicos, se utilizó ácido gálico como estándar en concentraciones de 0.0125 a 0.2 mg/mL (Sigma-Aldrich™, México), expresando los resultados como mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de masa seca (mg EAG·g⁻¹). Para los flavonoides, se utilizó catequina como estándar en un rango de 0.12 a 0.2 mg/mL (Sigma-Aldrich™, México), y los resultados se expresaron como mg de equivalentes de catequina por gramo de masa seca (mg EC·g⁻¹).

Cuantificación de azúcares reductores

La determinación de azúcares reductores se realizó siguiendo metodologías previas (Valero-Galván *et al.*, 2024; Ávila-Núñez *et al.*, 2012). Para su cuantificación, se tomaron 50 μL de cada uno de los doce extractos y, por triplicado, se depositaron en tubos independientes de 1.5 mL. Luego, se añadieron 150 μL de una solución de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) a 43 mM y la mezcla se incubó a 95 °C durante 5 min en un termoblock (Scientific, USA).

Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. Posteriormente, los tubos se enfriaron en hielo durante 2 min y el contenido de cada muestra se transfirió a celdas independientes en una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). La absorbancia se midió a 540 nm en un espectrofotómetro (Hercules, USA) acoplado al software Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Para la cuantificación, se generó una curva de calibración utilizando glucosa como estándar en un rango de 0.6 a 10 mg/mL (Sigma-Aldrich, México). Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de glucosa por gramo de peso seco (mg EG·g⁻¹).

Cuantificación de la actividad antioxidante

La actividad antioxidante se evaluó mediante los ensayos de reducción del ion férrico (FRAP) y captura del radical DPPH (Valero-Galván *et al.*, 2024; Moreno-Escamilla *et al.*, 2017).

Para FRAP, 24 μL de cada extracto, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). Como blancos, se emplearon los mismos solventes utilizados en la extracción. Se añadieron 180 μL de reactivo FRAP (10 mM TPTZ, 300 mM acetato de sodio y 20 mM FeCl_3 ; Sigma-Aldrich™, México) y se incubó a 25 °C en oscuridad durante 15 min. Luego, se midió la absorbancia a 595 nm en un espectrofotómetro (Hercules, USA) con el software Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Para DPPH, 25 μL de cada extracto, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). Se añadieron 200 μL de DPPH 190 μM (Sigma-Aldrich, México) y se incubó a 25 °C en oscuridad durante 15 min. Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. La absorbancia se midió a 517 nm en las mismas condiciones que en FRAP.

Para la expresión de los resultados, se construyeron curvas de calibración con TROLOX como estándar en un rango de 8 a 130 $\mu\text{M/mL}$ para FRAP y de 25 a 400 $\mu\text{M/mL}$ para DPPH (Sigma-Aldrich, México). Los resultados se expresaron en μM de equivalentes de TROLOX por gramo de masa seca ($\text{mmol ET}\cdot\text{g}^{-1}$).

Análisis Estadístico

Los datos se analizaron utilizando el software estadístico SPSS (IBM®, versión 15.0, EE. UU.) para evaluar diferencias significativas en el contenido de pigmentos, compuestos fitoquímicos y actividad antioxidante. Se aplicó un análisis de varianza de dos factores (ANOVA) considerando como variables independientes el tipo de solvente (metanol, etanol y acetona) y la variación interespecífica (*C. spinosior*, *C. kleiniae*, *C. imbricata* y *C. arbuscula*).

Para comparar las medias entre grupos, se realizó una prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$, considerando tres grupos para el tipo de solvente y cuatro grupos para la variación interespecífica.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de funciones discriminantes canónicas para visualizar la diferenciación entre especies. Se analizó la varianza explicada y se identificaron las variables que contribuyen a la separación de las especies dentro del género *Cylindropuntia*, utilizando los coeficientes canónicos de correlación de la matriz de estructura.

3. Resultados y discusión

Extracción de los fitoquímicos y actividad antioxidante considerando los solventes

Con respecto a la extracción de los pigmentos de los estambres, se observó que el etanol al 80 % fue la mejor opción en la extracción de clorofila a (200 % con respecto al metanol); sin embargo, el metanol al 80 % mostró mayor eficiencia en la extracción de la clorofila b (504 % con respecto al metanol), de las clorofilas c, d, totales y de carotenoides (357 %, 229 %, 133 % y 188 %, respectivamente, con respecto a la acetona), y de las betacianinas y betalainas (160 % y 50 %, respectivamente, respecto al metanol); finalmente, la acetona al 80 % fue la más eficiente en la extracción de las xantofilas (125 % respecto al etanol) (Tabla 1). Con respecto a la extracción de los compuestos fenólicos de los estambres, no se observaron diferencias significativas entre los tres solventes analizados en la extracción de los fenoles totales, aunque en el caso de la extracción de flavonoides el metanol al 80 % fue más eficiente (158 % con respecto a la acetona) (Tabla 1). Por otro lado, la acetona acuosa fue la mejor opción para la extracción de los azúcares reductores (111 % con respecto a los solventes alcohólicos). Finalmente, para la determinación de la capacidad antioxidante, la acetona acuosa fue ligeramente más eficiente para la determinada mediante FRAP, mientras que con los tres solventes se obtuvieron valores similares para el método basado en DPPH (Tabla 1).

Tabla 1. Evaluación del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante en los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*, considerando exclusivamente la variación entre los solventes empleados.**Table 1.** Evaluation of phytochemicals and antioxidant activity content in the stamens from four *Cylindropuntia* species, considering exclusively the variation among the solvents used.

Pigmentos	Solvente		
	Metanol	Etanol	Acetona
Clorofila a*	15.67±0.93 ^a	31.49±0.93 ^b	28.29±0.93 ^b
Clorofila b*	22.15±1.60 ^c	4.39±1.60 ^a	14.82±1.60 ^b
Clorofila c*	21.12±1.93 ^b	14.41±1.93 ^b	5.91±1.93 ^a
Clorofila d*	15.90±1.65 ^b	9.07±1.65 ^a	6.93±1.65 ^a
Clorofila total*	74.86±3.52 ^b	59.35±3.52 ^a	55.93±3.52 ^a
Xantofilas*	10.28±3.78 ^a	10.58±3.78 ^a	13.77±3.78 ^b
Carotenoides*	15.16±1.74 ^b	8.03±1.74 ^a	8.23±1.74 ^a
Betacianinas*	0.080±0.00 ^b	0.050±0.00 ^a	0.070±0.00 ^b
Betaxantinas*	0.038±0.00 ^b	0.032±0.00 ^a	0.040±0.00 ^b
Betalaínas*	0.120±0.00 ^b	0.080±0.00 ^a	0.110±0.00 ^b
Fenoles **	9.28±0.49 ^a	9.58±0.49 ^a	8.89±0.49 ^a
Flavonoides ***	3.31±0.30 ^b	2.96±0.30 ^{ab}	2.10±0.30 ^a
Azúcares reductores ****	116.25±1.13 ^a	115.08±1.13 ^a	129.42±1.13 ^b
FRAP *****	22.25±0.36 ^a	21.04±0.36 ^a	24.40±0.36 ^b
DPPH *****	21.89±0.25 ^a	22.17±0.25 ^a	22.13±0.25 ^a

*Datos expresados en mg·g⁻¹ de masa seca. ** mg de equivalentes de ácido gálico por g de masa seca (mg EAG·g⁻¹); *** mg de equivalentes de catequina por g de masa seca (mg EC·g⁻¹); **** mg equivalentes de glucosa por g de masa seca (mg EG·g⁻¹); ***** μM equivalentes de TROLOX por g de masa seca (μM ET·g⁻¹). Los valores se presentan como media ± desviación estándar y se analizaron mediante una ANOVA ($p < 0.05$). Diferentes letras (a-b) muestran los resultados de la prueba múltiple de Tukey, que indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

Los fitoquímicos de las plantas tienen polaridades variables, por lo que la elección del solvente es esencial para la mayor cantidad de estos compuestos. La eficiencia de su extracción depende de factores como la resistencia de la pared celular vegetal, el poder de penetración y las propiedades de solvatación del solvente, la duración de la extracción y el uso de métodos de disrupción mecánica (Islam *et al.*, 2024). Las propiedades ideales de un solvente de extracción deben incluir la buena solubilidad del compuesto de interés y volatilidad a bajas temperaturas, entre otras (Nortjie *et al.*, 2022). En relación con el agua, los solventes utilizados en este trabajo pueden ordenarse de menor a mayor polaridad, de la siguiente manera: acetona < etanol < metanol < agua (Sinha *et al.*, 2022). Los alcoholes, como el metanol y el etanol, son solventes orgánicos polares próticos (contienen un grupo -OH con un protón ácido que puede formar enlaces de hidrógeno), que se utilizan para extraer una amplia gama de fitoquímicos desde baja a alta polaridad; ambos son miscibles en agua, inocuos, previenen el crecimiento microbiano y solo se requiere una pequeña cantidad de calor para que volatilicen. La acetona es un solvente orgánico polar aprótico (no contiene protones ácidos por lo que no puede formar enlaces de hidrógeno), con capacidad de extraer moléculas tanto hidrofílicas

como lipofílicas; es miscible en agua, volátil y también presenta baja toxicidad (Sinha *et al.*, 2022). La capacidad de extracción de estos tres solventes se puede modular fácilmente añadiendo una pequeña cantidad de agua, lo que provoca un ligero aumento de su polaridad (Sinha *et al.*, 2022; Tungmunthum *et al.*, 2020). Además, cuanto menor sea el tamaño de partícula, mejor será el resultado de la extracción, ya que aumenta la permeación y la difusión del soluto, mejorando así la eficiencia de la extracción (Sinha *et al.*, 2022). De los tres solventes, el etanol es el menos tóxico para los humanos y cumple con los principios de la química verde (Tungmunthum *et al.*, 2020).

Las clorofilas están compuestas por un núcleo tetrapirrólico que contiene un átomo de Mg central y una cadena lateral unida al C17, que difiere según el tipo de clorofila (Tamiaki y Kichishima, 2025). Aunque son moléculas lipofílicas, existe una pequeña diferencia en la polaridad de los distintos tipos de clorofilas determinada por ciertos grupos funcionales que difieren en el anillo de porfirina. Las clorofilas a, b y d contienen en el C17 un grupo de fitiloxycarbonilo ($-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}$ -fitilo) y se diferencian en los siguientes sustituyentes: en el C7 del anillo de porfirina, la clorofila a contiene un grupo metilo ($-\text{CH}_3$) y la clorofila b un grupo formilo ($-\text{CHO}$); por otro lado, en el C3, la clorofila a contiene un grupo formilo ($-\text{CHO}$) y la clorofila d un grupo vinilo ($-\text{CH}=\text{CH}_2$). En la clorofila c, el anillo de porfirina no está reducido y contiene en el C17 un grupo *trans*-2-carboxietenilo ($-\text{CH}=\text{CHCOOH}$) en lugar del fitol, por lo que se puede considerar menos hidrofóbicas que los otros tres tipos de clorofilas (Tamiaki y Kichishima, 2025). Por tanto, por su naturaleza química, las clorofilas son insolubles en agua, pero soluble en solventes orgánicos, siendo los más utilizados para su extracción el etanol o la acetona (Sun *et al.*, 2024). Si se considera la extracción de las clorofilas totales en los estambres, en este trabajo el metanol acuoso fue el más eficiente (Tabla 1). Aunque no existen estudios sobre el contenido de clorofilas en estambres usando diferentes solventes, estos resultados se sustentan por medio del estudio de Vicaş *et al.* (2010). Estos autores en un estudio de los pigmentos de clorofila de hojas de *Viscum album* (muérdago) utilizando diferentes solventes (metanol, acetona y N,N-dimetilformamida) a partir de germoplasma rumano, indicaron que el metanol es el solvente con mayor capacidad de extracción de las clorofilas.

Los carotenoides son tetraterpenoides (contienen 40 átomos de carbono), por lo que son moléculas lipofílicas, solubles en disolventes orgánicos como la acetona y el etanol, entre otros. Existen alrededor de 600 carotenoides que pueden clasificarse como carotenos o carotenoides (que presentan en la estructura sólo átomos de carbono e hidrógeno) y xantofilas, que son compuestos hidrocarbonados oxigenados que tienen al menos un átomo de oxígeno, grupos hidroxilo, ceto, epoxi, metoxi o carboxilo, por lo que son menos hidrofóbicas que los carotenoides (Butnariu, 2016). En este estudio el metanol acuoso fue el más eficiente para la extracción de los carotenoides de los estambres (Tabla 1). Sin embargo, estos resultados contrastan con el contenido de carotenoides encontrado en hojas de *V. album* utilizando diferentes solventes (metanol, acetona y N,N-dimetilformamida), donde la acetona fue el solvente con mayor capacidad de extracción de estos compuestos (Vicaş *et al.*, 2010).

Las betalainas, que incluyen a las betaxantinas y betacianinas, son pigmentos nitrogenados derivados de la tirosina solubles en agua. En este análisis, la acetona acuosa fue la más eficiente en su extracción (Tabla 1). En estudios previos, se ha comprobado que las soluciones hidroalcohólicas de baja polaridad son más eficaces que los solventes polares para su extracción debido a las débiles interacciones electrostáticas en estos pigmentos, al producir un efecto inhibitorio sobre las enzimas endógenas en comparación con el agua y al reducir la coextracción de pectina y otras fibras (Eyshi *et al.*, 2024).

La extracción de compuestos fenólicos a partir de material vegetal depende principalmente de la naturaleza de la matriz de la muestra, pero también de las propiedades químicas de los compuestos fenólicos deseados, como el número de anillos aromáticos y grupos hidroxilo en su estructura, polaridad y concentración, por lo que es difícil seleccionar un único método para su extracción (Kumar y Goel, 2019). Las diferencias observadas entre el contenido de los compuestos fenólicos en diferentes solventes se relacionan principalmente con sus diferentes polaridades, es decir, la diferente solubilidad de los compuestos individuales en el solvente de extracción. Finalmente, se ha demostrado que los solventes alcohólicos, a pesar de tener menor polaridad que los acuosos, disuelve las paredes celulares vegetales de manera más efectiva que el agua, lo que resulta en una mayor liberación de polifenoles de las células. El metanol es el solvente óptimo para extraer compuestos polifenólicos debido a su capacidad para inhibir las reacciones de la polifenol oxidasa y su facilidad de evaporación en comparación con el agua (Tripathi *et al.*, 2025). En el presente estudio no se observaron diferencias con respecto al solvente para extraer fenoles, sin embargo, el metanol fue el mejor solvente para extraer flavonoides (Tabla 1). Estos resultados se respaldan por estudios previos, donde el metanol fue el solvente más adecuado para la extracción de fenólicos y flavonoides en diferentes tejidos y plantas (Ammar *et al.*, 2015; Yen *et al.*, 1996; Hertog *et al.*, 1993).

En el presente estudio el etanol acuoso fue el más eficiente en la extracción de los fenoles de los estambres de las especies de *Cylindropuntia*, mientras que el metanol acuoso lo fue en la de los flavonoides (Tabla 1). Estos resultados concuerdan parcialmente con los determinados en estambres de *Crocus sativus* L. (azafrán) donde se encontró que el metanol acuoso fue el solvente que obtuvo los mayores contenidos de compuestos fenólicos y flavonoides (Mamri *et al.*, 2024; Jadouali *et al.*, 2017). Sin embargo, Mohd-Zin *et al.* (2021) observaron valores más bajos del contenido de fenólicos en extractos metanólicos acuosos que los extractos de acetato de etilo acuosos en estambres de nenúfar (*Nymphaeaceae antares*).

La actividad antioxidante de los extractos vegetales no se debe evaluar con un solo método debido a la naturaleza compleja de los fitoquímicos, ya que su determinación depende en gran medida del mecanismo de reacción involucrado: el ensayo mediante FRAP se basa en una reacción de transferencia de electrones, mientras que el ensayo mediante DPPH se considera un método mixto ya que se basa tanto en la transferencia de electrones como de átomos de hidrógeno (Tungmunthum *et al.*, 2020). En el presente estudio, los extractos obtenidos con la acetona acuosa presentaron los valores mayores en la actividad antioxidante determinada por FRAP (Tabla 1). Estos resultados fueron contrarios a los determinados en estambres de *C. sativus* donde se encontró que los extractos metanólicos presentaron los valores más elevados en la actividad antioxidante determinada por DPPH y FRAP (Jadouali *et al.*, 2017).

Contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante considerando a las especies

Con respecto a la determinación de las clorofilas en los estambres, *C. imbricata* presentó un contenido mayor de clorofila a, mientras que *C. arbuscula* el más bajo (Tabla 2). En *C. kleiniae* se encontró un contenido mayor de clorofila b, mientras que *C. spinosior*, *C. imbricata* y *C. arbuscula* presentaron los valores más bajos (Tabla 2). No se observaron diferencias significativas en los niveles de clorofila c entre los estambres de las cuatro especies (Tabla 2). Para la clorofila d, *C. imbricata* mostró un contenido mayor, comparado con el de las otras tres especies (Tabla 2). En el contenido

total de clorofila, *C. imbricata* presentó los valores más altos, mientras que *C. arbuscula* mostró los más bajos (Tabla 2).

En cuanto al contenido de los carotenoides en los estambres, *C. spinosior* presentó el contenido mayor de xantofilas, mientras que *C. kleiniae* y *C. arbuscula* el más bajo (Tabla 2). En las especies *C. kleiniae*, *C. imbricata* y *C. arbuscula* se encontraron contenidos mayores de carotenoides, que en *C. spinosior* (Tabla 2). Sin embargo, en esta última especie se encontró un contenido mayor de betacianinas, betaxantinas y betalaínas en comparación con las otras tres especies, de las cuales *C. arbuscula* presentó los valores más bajos (Tabla 2).

Los estambres de las especies *C. imbricata*, *C. kleiniae* y *C. arbuscula* presentaron un contenido más alto de fenólicos totales, en comparación con los de *C. spinosior* (Tabla 2). Por otro lado, se obtuvieron niveles similares en el contenido de flavonoides en las cuatro especies (Tabla 2).

Con respecto a los azúcares reductores, en *C. kleiniae* se encontró un contenido mayor que en las otras tres especies, siendo en *C. imbricata* donde se presentaron los valores más bajos (Tabla 2).

Tabla 2. Evaluación del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante en los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*, considerando exclusivamente la variación entre las especies.

Table 2. Evaluation of phytochemicals and antioxidant activity content in the stamens from four *Cylindropuntia* species, considering exclusively the variation among the species.

Pigmentos	Especies			
	<i>C. kleiniae</i>	<i>C. spinosior</i>	<i>C. imbricata</i>	<i>C. arbuscula</i>
Clorofila a*	18.88±1.07 ^b	19.63±1.07 ^b	49.51±1.07 ^c	12.58±1.07 ^a
Clorofila b*	20.08±1.84 ^b	11.86±1.84 ^a	11.38±1.84 ^a	11.83±1.84 ^a
Clorofila c*	14.15±2.25 ^a	18.03±2.25 ^a	12.97±2.25 ^a	10.04±2.25 ^a
Clorofila d*	9.47±1.91 ^a	8.57±1.91 ^a	15.24±1.91 ^b	9.24±1.91 ^a
Clorofila total*	62.57±4.07 ^b	58.11±4.07 ^{ab}	89.10±4.07 ^c	43.73±4.07 ^a
Xantofilas*	2.98±5.71 ^a	29.37±5.71 ^c	10.31±5.71 ^b	3.50±5.71 ^a
Carotenoides*	16.63±1.81 ^b	1.76±1.81 ^a	11.35±1.81 ^b	12.15±1.81 ^b
Betacianinas*	0.020±0.00 ^b	0.190±0.00 ^d	0.050±0.00 ^c	0.010±0.00 ^a
Betaxantinas*	0.020±0.00 ^a	0.080±0.00 ^c	0.030±0.00 ^b	0.010±0.00 ^a
Betalaínas*	0.040±0.00 ^a	0.270±0.00 ^c	0.080±0.00 ^b	0.020±0.00 ^a
Fenólicos **	9.77±0.57 ^b	7.37±0.57 ^a	10.97±0.57 ^b	8.91±0.57 ^{ab}
Flavonoides ***	2.52±0.31 ^a	2.98±0.31 ^a	2.57±0.31 ^a	3.78±0.31 ^a
Azúcares reductores ****	136.89±1.3 ^d	115.56±1.3 ^b	98.22±1.3 ^a	130.33±1.3 ^c
FRAP *****	24.52±0.42 ^c	21.63±0.42 ^b	26.00±0.42 ^c	18.08±0.42 ^a
DPPH *****	23.84±0.28 ^c	20.86±0.28 ^a	22.56±0.28 ^b	21.01±0.28 ^a

* Datos expresados en mg por g de masa seca (mg·g⁻¹). ** mg de equivalentes de ácido gálico por g de masa seca (mg EAG·g⁻¹); *** mg de equivalentes de catequina por g de masa seca (mg EC·g⁻¹); **** mg equivalentes de glucosa por g de masa seca (mg EG·g⁻¹); ***** μM de equivalentes de TROLOX por g de masa seca (μM ET·g⁻¹). Los valores se presentan como media ± desviación estándar y se analizaron mediante una ANOVA ($p < 0.05$). Diferentes letras (a-d) muestran los resultados de la prueba múltiple de Tukey, que indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

La mayor actividad antioxidante determinada por FRAP se encontró en los estambres de *C. imbricata* y *C. kleiniae*, mientras que en los de *C. arbuscula* se encontró la menor (Tabla 2). Por otro lado, *C. kleiniae* mostró la mayor actividad antioxidante determinada por DPPH, mientras que en los de las especies *C. spinosior* y *C. arbuscula* se encontraron los niveles más bajos (Tabla 2).

En el presente estudio se observó una variación interespecífica significativa en los contenidos de clorofila a (de 12.58 a 49.51 mg·g⁻¹), clorofila b (de 11.38 a 20.08 mg·g⁻¹), clorofila d (de 9.24 a 15.24 mg·g⁻¹), clorofila total (de 43.73 a 89.10 mg·g⁻¹); xantofilas (de 2.98 a 29.37 mg·g⁻¹) y carotenoides (de 1.76 a 16.63 mg·g⁻¹); betacianinas (de 0.010 a 0.190 mg·g⁻¹), betaxantinas (de 0.010 a 0.080 mg·g⁻¹) y betalainas (de 0.020 a 0.270 mg·g⁻¹); fenólicos totales (de 7.37 a 10.97 mg GAE·g⁻¹); azúcares reductores (de 98.22 a 136.89 mg EG·g⁻¹) y actividad antioxidante determinada por FRAP (de 18.08 a 26.00 μM ET·g⁻¹) y DPPH (de 21.01 a 23.84 μM ET·g⁻¹) (Tabla 2). Aunque no existen estudios donde se haya cuantificado el contenido de fitoquímicos en estambres del género *Cylindropuntia*, en otro tipo de cactácea como es el del género *Opuntia* (Acosta, 2023), se observó una variación interespecífica entre *O. microdasys*, *O. macrocentra*, *O. engelmannii* y *O. arenaria* en extractos metanólicos acuosos de estambres en el contenido de clorofila a (de 5.84 a 14.76 mg·g⁻¹), clorofila b (de 11.28 a 25.02 mg·g⁻¹) y clorofila total (de 23.95 a 29.22 mg·g⁻¹), donde los valores observados fueron más bajos a los determinados en *Cylindropuntia*; en el contenido de xantofilas (de 1.66 a 4.85 mg·g⁻¹) y carotenoides (de 6.04 a 13.91 mg·g⁻¹), obteniéndose valores similares a los encontrados en el presente estudio; en el contenido de betacianinas (de 0.14 a 0.22 mg·g⁻¹), betaxantinas (de 0.010 a 0.02 mg·g⁻¹) y betalainas (de 0.16 a 0.23 mg·g⁻¹), con niveles semejantes a los determinados en el presente estudio; en el contenido de fenólicos totales (de 5.07 a 6.56 mg GAE·g⁻¹), con valores más bajos a los determinados en *Cylindropuntia*; en el contenido de flavonoides (de 3.66 a 4.81 mg CE·g⁻¹), siendo superiores a los determinados en el presente estudio; en el contenido de azúcares reductores (de 86.14 a 159.28 mg EG·g⁻¹), siendo valores similares a los de las especies de *Cylindropuntia*; y en la actividad antioxidante determinada por FRAP (de 18.46 a 27.47 μM ET·g⁻¹) y DPPH (de 10.64 a 17.42 μM ET·g⁻¹), obteniéndose niveles similares para los determinados por FRAP, pero inferiores a los determinados por DPPH (Acosta, 2023).

Comparando el contenido de fitoquímicos obtenido en los estambres de *Cylindropuntia* con los datos presentados en estudios previos de estambres de otro tipo de plantas, el contenido de carotenoides fue menor (de 1.76 a 16.63 mg·g⁻¹) (Tabla 2) que el reportado por Azghandi-Fardaghi et al. (2021) y Mamri et al. (2024) en estambres de *C. sativus* (159.14 mg·g⁻¹ y 152.97 Eq β-C mg·g⁻¹, respectivamente). Igualmente, el contenido de los fenoles totales fue menor (de 5.07 a 6.56 mg GAE·g⁻¹) (Tabla 2) que lo descrito por Jadouali et al. (2017) (35.69 mg GAE·g⁻¹) y por Mamri et al. (2024) (126.31 mg GAE·g⁻¹) en estambres de *C. sativus* y por Mohd-Zin et al., (2021) en estambres de *N. antares* (118.83 mg GAE·g⁻¹). El contenido de flavonoides también fue menor en los estambres de *Cylindropuntia* (2.52 a 3.78 mg CE·g⁻¹) (Tabla 2) que lo reportado por Jadouali et al. (2017) (14.10 mg CE·g⁻¹) y Mamri et al. (2024) (0.66 mg RE·g⁻¹) en estambres de *C. sativus*, por Mohd-Zin et al., (2021) en estambres de *N. antares* (82.23 mg CE·g⁻¹), por Tungmunthum et al., (2020) en estambres de *Nymphaea lotus* L. (loto egipcio blanco) (230.74 mg·g⁻¹) y por Zhang et al., (2023) en estambres de dos cultivares de *Punica granatum* (granada) (99.10 mg RE·g⁻¹ y 105.97 mg RE·g⁻¹); sin embargo, en un estudio más reciente realizado en estambres de *C. sativus* el contenido de flavonoides fue inferior (0.66 mg RE·g⁻¹) (Mamri et al., 2024) que el encontrado en las especies de *Cylindropuntia*. Finalmente, los estambres de *Cylindropuntia* tuvieron una capacidad antioxidante menor determinada por DPPH que los estambres de *Paeonia suffruticosa* (peonía arbórea) (207.80 μM ET·g⁻¹) (Xiang et al., 2019).

La variabilidad en los contenidos de los fitoquímicos entre los diferentes géneros y especies se asocia con la adaptación de las plantas, potencialmente impulsada por factores genéticos o ambientales, y contribuir a una mayor protección contra el estrés oxidativo (Zhang *et al.*, 2023). En general, los compuestos fenólicos son responsables de muchas interacciones entre las plantas y su entorno biótico y abiótico (Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012). Asimismo, estos compuestos tienen una distribución orgánica específica y se acumulan diferencialmente durante la ontogénesis y bajo la influencia de factores ambientales (Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012; Ayan *et al.*, 2007). Además, la biosíntesis de compuestos fenólicos está compartimentada subcelularmente y el papel de los compartimentos celulares no se ha dilucidado totalmente (Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012).

Los resultados mostraron que el contenido en fitoquímicos varió dependiendo de la especie. Estas diferencias en la concentración de compuestos fenólicos y actividad antioxidante entre las cuatro especies de *Cylindropuntia* pueden ser el resultado de procesos de adaptación de las plantas a las condiciones ambientales y a variaciones genéticas. Varios estudios han mostrado diferencias en las concentraciones de fitoquímicos entre variedades dentro de un mismo género (Zhang *et al.*, 2023); también influyen la fase fenológica y las diferentes condiciones de crecimiento de las plantas (Feng *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023; Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012). Otros estudios indican que plantas desarrolladas en condiciones climáticas más extremas como en altitudes altas hacen que estén expuestas a intensidades de luz mayores, por lo que un mecanismo para prevenir el daño oxidativo causado por la fotooxidación podría ser el aumento de la concentración de fenólicos y flavonoides en ciertos órganos/tejidos de las plantas (Zhang *et al.*, 2023; Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012). Sin embargo, los resultados del presente trabajo al coleccionar las muestras en el mismo ambiente sugieren que las variaciones genéticas de cada especie podrían determinar las cantidades/perfiles de metabolitos secundarios para las especies estudiadas.

Análisis de funciones discriminantes canónicas

El análisis de funciones discriminantes canónicas mostró que las dos primeras funciones explicaron el 99.6 % de la variación total en el contenido de pigmentos. La primera función explicó el 81.8 % de la variación total, la cual se correlacionó con el contenido de betalaínas, betacianinas y betaxantinas. La segunda función, explicó el 17.8 % de la variación total y mostró una correlación con el contenido de la clorofila a y la clorofila total. Este análisis también mostró que las especies que presentaron perfiles de pigmentos más similares fueron *C. kleiniae* (1) y *C. arbuscula* (4), las cuales se agruparon hacia la parte inferior izquierda del diagrama, mientras que las otras dos especies fueron más diferentes en los contenidos de pigmento debido a que *C. spinosior* (2) se separó significativamente hacia la derecha del diagrama y *C. imbricata* (3) se separó hacia la parte superior del diagrama (Fig. 1).

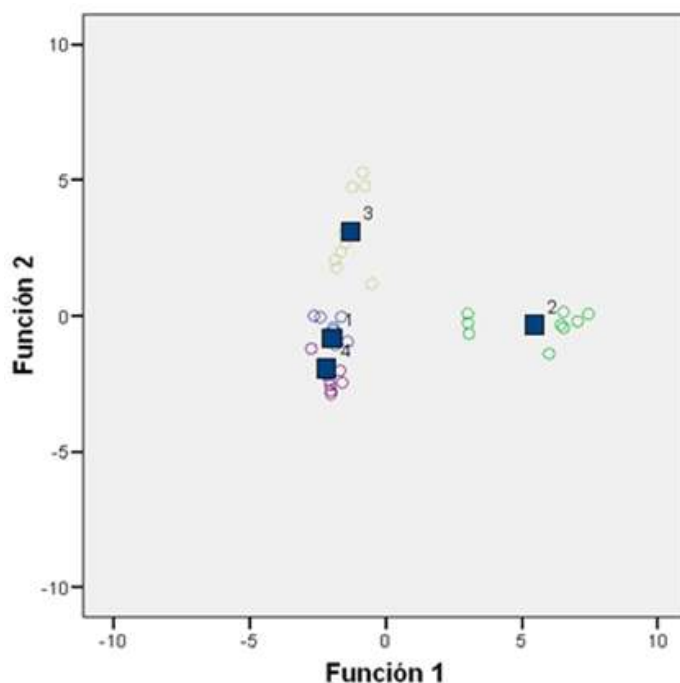


Figura 1. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas sobre el contenido de pigmentos de los estambres y pólenes de *C. kleiniae* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3) y *C. arbuscula* (4). Cada punto representa una muestra individual y su distribución está determinada por las funciones discriminantes. Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Scatter plot of canonical discriminant functions on the pigment content of stamens and pollens from *C. kleiniae* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3), and *C. arbuscula* (4). Each point represents an individual sample, and its distribution is determined by the discriminant functions. Source: Own elaboration.

Por otro lado, el análisis de las dos funciones discriminantes canónicas basadas en el contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante explicaron el 92.7 % de la variación total. La primera función explicó el 69.9 % de la variancia total y se correlacionó con la actividad antioxidante determinada por DPPH y una correlación negativa con el contenido de flavonoides. La segunda función explicó el 22.8 % de la variación total y se correlacionó con los azúcares reductores. Ambas funciones mostraron que las especies que presentan perfiles de fitoquímicos más similares fueron *C. spinosior* (2) y *C. arbuscula* (4), mientras que la más diferente fue *C. kleiniae* (1), que se separó hacia la parte superior derecha del diagrama, y *C. imbricata* (3), que se separó hacia la parte inferior derecha del diagrama (Fig. 2).

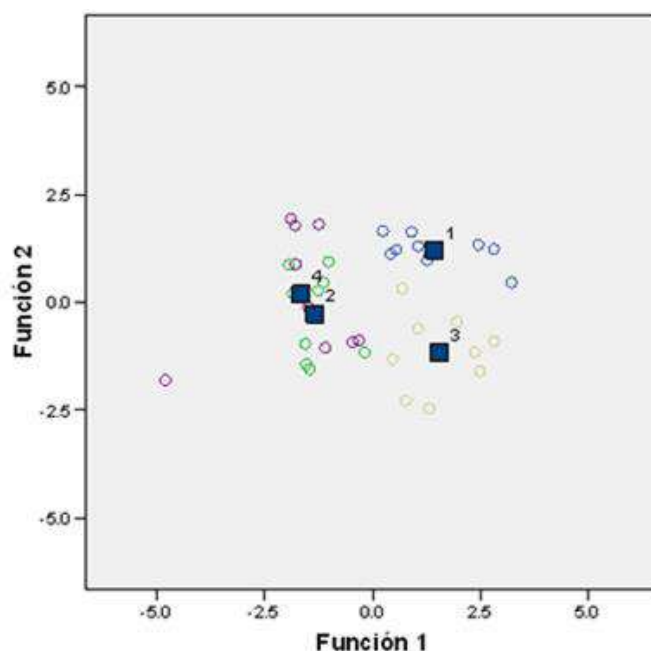


Figura 2. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas sobre el contenido de fitoquímicos y evaluación de la actividad antioxidante de los estambres y pólenes de *C. kleinioides* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3) y *C. arbuscula* (4). Cada punto representa una muestra individual y su distribución está determinada por las funciones discriminantes. Fuente: Elaboración propia.

Figure 2. Scatter plot of canonical discriminant functions on the phytochemical content and antioxidant activity assessment of stamens and pollen from *C. kleinioides* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3), and *C. arbuscula* (4). Each point represents an individual sample, and its distribution is determined by the discriminant functions. Source: Own elaboration.

Las Figs. 1 y 2, confirman las diferencias interespecíficas en la composición de fitoquímicos y capacidad antioxidante de los estambres de las cuatro especies estudiadas, permitiendo una mejor comprensión de las adaptaciones ecológicas y evolutivas de estas especies. Dentro de las variables que mostraron una mayor correlación a la diferenciación de las especies en los contenidos de los fitoquímicos fueron las clorofilas a y totales, betalainas, flavonoides, azúcares reductores y la actividad antioxidante determinada por DPPH.

C. imbricata presentó los valores más altos en el contenido de estas dos clorofilas seguido de *C. spinosior*, *C. kleinioides* y *C. arbuscula*. Las clorofilas, aunque su función principal es la fotosíntesis en las hojas, también pueden estar presentes en los pétalos y el polen, donde contribuyen a la absorción de luz y posiblemente a la protección contra el estrés lumínico (Narbona *et al.*, 2014; Manrique-Reol, 2003). Posiblemente, los estambres de *C. imbricata* presenten mejores mecanismos para captar con mayor eficiencia la absorción de luz y posiblemente en la protección contra el estrés lumínico. Asimismo, *C. spinosior* presentó los valores más elevados en el contenido de betalainas, seguida de *C. imbricata*, *C. kleinioides* y, por último, de *C. arbuscula*. Las betalainas, además de su función antioxidante, influyen en la coloración de las flores y en la atracción polinizadores (Stintzing y Carle, 2004). Posiblemente, los estambres de *C. spinosior* presenten mejores mecanismos para intensificar la

coloración de los estambres para atraer más polinizadores a sus flores. El contenido de fenoles y la actividad antioxidante determinada por DPPH fue superior en *C. kleiniae*, seguido de *C. imbricata*, *C. arbuscula* y, por último, de *C. spinosior*. Los compuestos fenólicos en los estambres podrían estar protegiendo al polen del daño por radiación UV y estrés oxidativo (Taylor y Hepler, 1997). También, el contenido de azúcares reductores fue más alto en los estambres de *C. kleiniae*, seguido de *C. arbuscula*, *C. spinosior* y *C. imbricata*. Los azúcares reductores proporcionan energía para la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico (Pacini, 1996).

Algunos estudios previos han utilizado los análisis discriminantes para dilucidar la similitud entre poblaciones o especies y el patrón de estas asociaciones a las variables medidas como el contenido de fitoquímicos y la actividad antioxidante (González-Fernández *et al.*, 2025, Reyes-Corral *et al.*, 2022; Berrabah *et al.*, 2019). Concretamente, el análisis de funciones discriminantes encuentra funciones lineales de variables cuantitativas que separan al máximo grupos de individuos (procedencias) mientras mantienen la variación dentro de las procedencias lo más pequeña posible. Este enfoque distingue varias funciones discriminantes canónicas no correlacionadas. Se trata de combinaciones lineales de las variables originales que separan mejor las medias de los grupos de observaciones en relación con la variación dentro del grupo. Sin embargo, los resultados de estos estudios son complicados de comparar con los resultados obtenidos en el presente estudio, debido a que no pertenecen a las mismas especies, tipos de solventes o bien diferente tipo de análisis discriminante.

Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron semejantes a los determinados por González-Fernández *et al.* (2025) sobre la caracterización del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante de semillas de *Echinocereus stramineus* (Cactaceae) en el municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, encontrándose que las dos primeras funciones del análisis discriminante canónico explicaron el 99.2 % de la varianza total y las variables que correlacionaron con estas dos primeras funciones también fueron los azúcares reductores, flavonoides y la actividad antioxidante determinada por DPPH. Reyes-Corral *et al.* (2022) en un estudio de la caracterización morfológica, germinación, contenido fitoquímico y actividad antioxidante en semillas de tres especies del género *Cylindropuntia* procedentes del municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, mencionaron que los dos primeros componentes principales explicaron el 99.9 % de la varianza total y dentro de las variables fitoquímicas que aportaron a la variación interespecífica de las tres especies analizadas fueron el contenido de proteína y la actividad antioxidante determinada por DPPH. Berrabah *et al.* (2019) en un estudio de la composición fitoquímica y propiedades antioxidantes de las flores de *Opuntia ficus-indica* a partir de germoplasma argelino, indicaron que las dos primeras funciones discriminantes explicaron el 90 % de la variancia total, mientras que las variables que correlacionaron para separar a las poblaciones estudiadas para ambas funciones también fueron los azúcares solubles y la actividad antioxidante. Estos resultados de alguna forma soportan los resultados obtenidos en el presente estudio.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio constituyen la primera información sobre la composición fitoquímica y la actividad antioxidante de los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*. Se demostró que el solvente metanólico acuoso fue el más eficiente para extraer clorofilas, carotenoides, betalaínas y flavonoides, mientras que el acetónico acuoso fue el mejor para extraer azúcares reductores. El análisis de funciones discriminantes canónicas mostró que las

especies que presentan perfiles de pigmentos más similares fueron *C. kleiniae* y *C. arbuscula*, mientras que las más distantes fueron *C. spinosior* (2) y *C. imbricata* (3). Dentro de las variables que mostraron una mayor correlación a la diferenciación de las especies en los contenidos de los pigmentos fueron el contenido de betalainas, clorofila a y total. Sin embargo, *C. spinosior* (2) y *C. arbuscula* presentaron los perfiles de fitoquímicos más similares, mientras que los más diferentes fueron *C. kleiniae* y *C. imbricata*. Las variables que presentaron un mayor peso en esta diferenciación fueron el contenido de flavonoides, azúcares reductores y la actividad antioxidante determinada por DPPH. En general, nuestros hallazgos sugieren que los estambres de *C. imbricata* y *C. spinosior* podrían constituir una buena fuente de sustancias biológicamente activas. Estos resultados también sientan las bases para realizar estudios más detallados para la identificación y cuantificación de los metabolitos secundarios más abundantes que estas especies producen en los estambres para dar esas aplicaciones en un futuro.

Agradecimientos

La presente investigación fue realizada con el apoyo de la infraestructura de los laboratorios del Departamento de Ciencias Químicas Biológicas del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de intereses en la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Acosta, Z.J. (2024). Análisis fitoquímico, antioxidante y caracterización del polen de *Opuntia microdasys*, *O. macrocentra*, *O. engelmannii* y *O. arenaria* de la sierra de Samalayuca, Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
- Agostini-Costa, T.S. (2022). Genetic and environment effects on bioactive compounds of *Opuntia cacti*—a review. *Journal of Food Composition and Analysis* 109: 104514. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104514>
- Aispuro-Hernández, E., Vergara-Jiménez, M. J., Cárdenas-Torres, F. I., Martínez-Téllez, M. A., & Ontiveros, N. (2022). Cactaceae plants as sources of active bioavailable phytochemicals. *Food & Function*, 13(19): 9720-9733. <https://doi.org/10.1039/D2FO01863B>
- Ammar, I., Ennouri, M., & Attia, H. (2015). Phenolic content and antioxidant activity of cactus (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers are modified according to the extraction method. *Industrial Crops and Products* 64: 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.030>
- Arvayo-Enríquez, H., Mondaca-Fernández, I., Gortáez-Moroyoqui, P., López-Cervantes, J., & Rodríguez-Ramírez, R. (2013). Carotenoids extraction and quantification: a review. *Analytical Methods*, 5(12): 2916-2924. <https://doi.org/10.1039/C3AY26295B>
- Ávila-Núñez, R., Rivas-Pérez, B., Hernández-Motzezak, R., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en *Agave cocui* Trelease. *Multiciencias* 12(2): 129-135. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90424216002>

- Ayan, A.K., Yanar, O., Cirak, C., & Bilgener, M. (2007). Morphogenetic and diurnal variation of total phenols in some *Hypericum* species from Turkey during their phenological cycles. *Bangladesh Journal of Botany* 36(1): 39-46. <https://doi.org/10.3329/bjb.v36i1.1547>
- Azghandi-Fardaghi, A., Es-haghi, A., Feizy, J., & Lakshmipathy, R. (2021). Antioxidant capacity and chemical composition of different parts of saffron flowers. *Journal of Food and Bioprocess Engineering* 4(1): 69-74. <https://doi.org/10.22059/jfab.2021.316326.1078>
- Balandrán-Quintana, R. R., González-León, A., Islas-Rubio, A. R., Madera-Santana, T.J., Soto-Valdez, H., Mercado-Ruiz, J. N., Peralta, E., Robles-Osuna, L.E., Vásquez-Lara, F., Carvallo-Ruiz, T., Granados-Nevárez, M. C., Martínez-Núñez, Y.Y., & Montoya-Ballesteros, L. C. (2018). An overview of cholla (*Cylindropuntia* spp.) from Sonora, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 20: 162-177. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v20i.35>
- Berrabah, H., Taïbi, K., Abderrahim, L. A., & Boussaid, M. (2019). Phytochemical composition and antioxidant properties of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers from the Algerian germplasm. *Food Measurement and Characterization* 13: 1166-1174. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00032-8>
- Bustamante, E., & Burquez, A. (2005). Fenología y biología reproductiva de las cactáceas columnares. *Cactaceas y Suculentas mexicanas* 50(3): 68-88. https://web.ecologia.unam.mx/cactsucmex/CACTACEAS2005_3.pdf
- Butnariu, M. (2016). Methods of analysis (extraction, separation, identification and quantification) of carotenoids from natural products. *Journal of Ecosystems & Ecography* 6: 193. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000193>
- Cardenas-Sandoval, B.A., López-Laredo, A.R., Martínez-Bonfil, B.P., Bermúdez-Torres, K., & Trejo-Tapia, G. (2012). Advances in the phytochemistry of *Cuphea aequipetala*, *C. aequipetala* var. *hispida* and *C. lanceolata*: Extraction and quantification of phenolic compounds and antioxidant activity. *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(3): 401-413. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S166527382012000300005&lng=es&tlng=en
- Castellanos-Santiago, E., & Yahia, E.M. (2008). Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(14): 5758-5764. <https://doi.org/10.1021/jf800362t>
- Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2018). Herbal beverages: Bioactive compounds and their role in disease risk reduction - A review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 8(4): 451-458. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2017.08.006>
- Das, G., Lim, K.J., Tantengco, O.A.G., Carag, H.M., Gonçalves, S., Romano, A., Das, S.K., Coy-Barrera, E., Shin, H.S., Gutiérrez-Grijalva, E.P., Heredia, J.B., & Patra, J.K. (2021). Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties. *Phytotherapy Research: PTR* 35(3): 1248-1283. <https://doi.org/10.1002/ptr.6889>
- de Castro Campos Pinto, N., & Scio, E. (2014). The biological activities and chemical composition of *Pereskia* species (Cactaceae) a review. *Plant Foods for Human Nutrition* 69(3): 189-95. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0423-z>
- Deltoro-Torró, V., Gómez-Serrano, M.A., Laguna-Lumbreras, E., & Novoa-Pérez, A. 2014. Bases para el control del cactus invasor *Cylindropuntia pallida*. Colección Manuales Técnicos de Biodiversidad, 5. Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient. Generalitat Valenciana. Valencia, España. https://www.oriuela.es/wp-content/uploads/2016/12/control_cactus_invasor.pdf

- Eyshi, S., Ghareaghajlou, N., Afshar Mogaddam, M.R., & Ghasempour, Z. (2024). Red beet betalains extraction process: A comprehensive review of methods, applications, and physicochemical properties. *Food Science & Nutrition* 12(11): 8540-8558. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4458>
- Feng, Y., Zhao, K., Li, J., Wang, M., Yin, H., Fan, Z., Li, X., & Liu, W. (2024). Transcriptome and pigment analyses provide insights into carotenoids and flavonoids biosynthesis in *Camellia nitidissima* stamens. *Horticulturae* 10(4): 420. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040420>
- Fontenele, R.S., Salywon, A.M., Majure, L.C., Cobb, I.N., Bhaskara, A., Avalos-Calleros, J.A., Argüello-Astorga, G.R., Schmidlin, K., Khalifeh, A., Smith, K., Schreck, J., Lund, M.C., Köhler, M., Wojciechowski, M.F., Hodgson, W.C., Puente-Martinez, R., Van-Doorslaer, K., Kumari, S., Oyeniran, K.A., & Varsani, A. (2021). New world Cactaceae plants harbor diverse Geminiviruses. *Viruses* 13(4): 694. <https://doi.org/10.3390/v13040694>
- Galván-Gutiérrez, R.A. (2019). Aislamiento de inhibidores de la ureasa presentes en un extracto metanólico de raíz de cholla (*Cylindropuntia cholla*) por cromatografía en columna. Tesis. Universidad Abierta y a Distancia de México, *Repositorio institucional de la Univer.* <http://www.repositorio.unadmexico.mx:8080/xmlui/handle/123456789/182>
- Georgé, S., Brat, P., Alter, P., & Amiot, M.J. (2005). Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(5): 1370-1373. <https://doi.org/10.1021/jf048396b>
- González-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., & Valero-Galván, J. (2023). Variaciones morfológicas en el fruto y semillas de cuatro estadios del fruto de *Cylindropuntia spinosior* (Cactaceae). *TECNOCENCIA Chihuahua*, 17(3): e1184. <https://doi.org/10.54167/tch.v17i3.1184>
- Gonzalez-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., Osuna-Avila, P., & Valero-Galván, J. (2025). Study on fruit seed morphology and morphometry, seed phytochemicals, and germination characterization in three populations of *Echinocereus stramineus* (Cactaceae) at Ciudad Juarez Municipality, Chihuahua, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 27: 35-55. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v27i.574>
- Grodzicki, W., & Dziendzikowska, K. (2020). The Role of selected bioactive compounds in the prevention of Alzheimer's Disease. *Antioxidants (Basel, Switzerland)* 9(3): 229. <https://doi.org/10.3390/antiox9030229>
- Guzmán, U., Arias, S., & Dávila-Aranda, P.D. (2003). Catálogo cactáceas mexicanas. Universidad Autónoma de México. CONABIO, México. <https://www.worldcat.org/es/title/catalogo-de-cactaceas-mexicanas/oclc/948238461>
- Hertog, M.G.L., Hollman, P.C.H., & Van de Putte, B. (1993). Content of potentially anticarcinogenic flavonoids of tea infusions, wines, and fruit juices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 41(8): 1242-1246. <https://doi.org/10.1021/jf00032a015>
- Hoang, T., & Kim, J. (2021). Phytonutrient supplements and metabolic biomarkers of cardiovascular disease: An umbrella review of meta-analyses of clinical trials. *Phytotherapy Research: PTR* 35(8): 4171-4182. <https://doi.org/10.1002/ptr.7079>
- Hunt, D. (2016). *CITES. Cactaceae Checklist* (3rd ed.). Royal Botanic Gardens Kew & International Organization for Succulent Plant Study. <https://www.kew.org/sites/default/files/2019-02/CITES%20Cactaceae%20Checklist%20Third%20Edition.pdf>
- Islam, M.S., Rahman, M.S., Khatun, M., Hajibeigy, M., Uddin, M.N., & Khatun, M.M. (2024). Extraction of organic pigments from tomato (*Solanum lycopersicum* L.), turmeric (*Curcuma longa* L.) and red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) for safe use in agroproducts. *Heliyon* 10(3): e25278. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25278>
- Jadouali, S.M., BouzoubaÃ¢, Z., Majourhat, K., Mamouni, R., Gharby, S., & Atifi, H. (2017, November). Polyphenols content, flavonoids and antioxidant activity of petals, stamens, styles

- and whole flower of *Crocus sativus* of Taliouine. *Acta Hort.* 1184: 301-308. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1184.43>
- Jiménez-Sierra, C.L. (2011). Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria* 12(1): 1-23. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/las-cactaceas-mexicanas-y-los-riesgos-que-enfrentan-5040758>
- Kumar, N., & Goel, N. (2019). Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports (Amsterdam, Netherlands)* 24: e00370. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00370>
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology* 148: 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Malusa, J., Felger, R., Rutman, & Baker, M. (2014). Ajo peak to tinajas altas: A flora in southwestern Arizona. Part 7. Eudicots: Cactaceae – Cactus Family. *Phytoneuron* 69: 1-95. <https://www.phytoneuron.net/2014Phytoneuron/69PhytoN-SWArizCacti.pdf>
- Mamri, S., Daoudi, N.E., Baraich, A., Ouahhoud, S., Khoulati, A., Choukri, M., Asehraou, A., Bnouham, M., Jaouadi, B., Abousalham, A., Dabiellil, F., Salamatullah, A.M., & Saalaoui, E. (2024). Comprehensive analysis of bioactive compounds in *Crocus sativus* stamens extracts by HPLC-DAD: investigating antidiabetic activity via in vitro, in vivo, and molecular docking simulation. *Frontiers in Chemistry* 12:1419120. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1419120>
- Márquez-Rangel, I., Cruz, M., Neira-Vielma, A.A., Ramírez-Barrón, S.N., Aguilar-Zarate, P., & Belmares, R. (2025). Plants from arid zones of Mexico: Bioactive compounds and potential use for food production. *Resources* 14(1): 13. <https://doi.org/10.3390/resources14010013>
- Manrique-Reol, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas* 12(1). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/250>
- Martínez, R.M., Melo, C.P.B., Pinto, I.C., Mendes-Pierotti, S., Vignoli, J.A., Verri, W.A., & Casagrande, R. (2024). Betalains: a narrative review on pharmacological mechanisms supporting the nutraceutical potential towards health benefits. *Foods* 13(23): 3909. <https://doi.org/10.3390/foods13233909>
- Mohd-Zin, Z., Sanuri, A.Z.M., Bashah, N., Ibrahim, K., Yahya, H., & Zainol, M.K. (2021). Effect of different extraction solvents on antioxidant properties of water lily (*Nymphaeaceae antares*) flower petal and stamen. *Food Research* 5(3): 359-368. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(3\).653](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(3).653)
- Moreno-Escamilla, J.O., Álvarez-Parrilla, E., De la Rosa, L.A., Núñez-Gastélum, J.A., González-Aguilar, G.A., & Rodrigo-García, J. (2017). Effect of different elicitors and preharvest day application on the content of phytochemicals and antioxidant activity of butterhead lettuce (*Lactuca sativa* var. Capitata) produced under hydroponic conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65(26): 5244-5254. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01702>
- Nagarajan, J., Wah-Heng, W., Galanakis, C. M., Nagasundara-Ramanan, R., Raghunandan, M.E., & Sun, J. (2016). Extraction of phytochemicals using hydrotropic solvents. *Separation Science and Technology* 51(7): 1151-1165. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1143842>
- Narbona, E., Buide, M.L., Casimiro-Soriguer, I., & Del Valle, J.C. (2014). Polimorfismos de color floral: causas e implicaciones evolutivas. *Ecosistemas* 23(3): 36-47. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-3.06>
- Ngo, T.V., Scarlett, C.J., Bowyer, M.C., Ngo, P.D., & Vuong, Q.V. (2017). Impact of different extraction solvents on bioactive compounds and antioxidant capacity from the root of *Salacia chinensis* L. *Journal of food quality* 1(1): 9305047. <https://doi.org/10.1155/2017/9305047>

- Nortjie, E., Basitere, M., Moyo, D., & Nyamukamba, P. (2022). Extraction methods, quantitative and qualitative phytochemical screening of medicinal plants for antimicrobial textiles: A review. *Plants (Basel, Switzerland)* 11(15): 2011. <https://doi.org/10.3390/plants11152011>
- Ortega-Baes, P., & Godínez-Álvarez, H. (2006). Global diversity and conservation priorities in the Cactaceae. *Biodiversity & Conservation* 15: 817-827. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-1461-x>
- Pacini, E. (1996). Types and meaning of pollen carbohydrate reserves. *Sexual Plant Reproduction* 9: 362-366. <https://doi.org/10.1007/BF02441957>
- Ramírez-Rodríguez, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüña, N., & Trujillo, J. (2020). Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae Fruits: Recent findings and research opportunities. *Food Chemistry* 312: 126073. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073>
- Rangel-Huerta, O.D., Pastor-Villaescusa, B., Aguilera, C.M., & Gil, A. (2015). A systematic review of the efficacy of bioactive compounds in cardiovascular disease: Phenolic compounds. *Nutrients* 7(7): 5177-5216. <https://doi.org/10.3390/nu7075177>
- Reyes-Corral, V. I., González-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., Rodrigo-García, J., Iván-Garza, G., & Valero-Galván, J. (2022). Characterization of the morphometry, germination process, phytochemicals, and antioxidant capacity of seeds of three species of the genus *Cylindropuntia* (Cactaceae) of Chihuahua state. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 24: 251-268. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.506>
- Ritchie, R.J. (2008). Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c, and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica* 46(1): 115-126. <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0019-7>
- Santos-Díaz, M. del S., & Camarena-Rangel, N.G. (2019). Cacti for production of metabolites: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 103: 8657-8667. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10125-5>
- Sinha, D., Mukherjee, S., & Chowdhury, S. (2022). Methods of extraction of phytochemicals. In Singh, A. (Ed.) *Isolation, Characterization, and Therapeutic Applications of Natural Bioactive Compounds* IGI Global. pp. 250-279. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7337-5.ch010>
- Stintzing, F.C., & Carle, R. (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science & Technology* 15(1): 19-38. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.004>
- Sun, D., Wu, S., Li, X., Ge, B., Zhou, C., Yan, X., Ruan, R., & Cheng, P. (2024). The structure, functions and potential medicinal effects of chlorophylls derived from microalgae. *Marine Drugs* 22(2): 65. <https://doi.org/10.3390/md22020065>
- Tamiaki, H., & Kichishima, S. (2025). Chlorophyll pigments and their synthetic analogs. *Plant & cell physiology* 66(2): 153-167. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcae094>
- Tripathi, S., Singh, S., Mishra, N., & Mishra, N. (2025). The impact of solvent polarity on the phenolic and antioxidant capacity of green coffee beans (*Robusta species*) extracts. *Nutrition Food Science* 13(2). <https://bit.ly/3XJs66v>
- Tungmunthum, D., Drouet, S., Kabra, A. & Hano, C. (2020). Enrichment in antioxidant flavonoids of stamen extracts from *Nymphaea lotus* L. using ultrasonic-assisted extraction and macroporous resin adsorption. *Antioxidants* 9(7): 576. <https://doi.org/10.3390/antiox9070576>
- Taylor, L.P., & Hepler, P.K. (1997). Pollen germination and tube growth. *Annual review of plant biology* 48: 461-491. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.461>
- Valero-Galván, J., Garza-Vallejo, G.I., Quiñones-Martínez, M., & González-Fernández, R. (2024). Seed morphometry and NaCl and sucrose effect on germination rates and phytochemicals in sotol

- (*Dasyilirion acrotrichum*) from the Chihuahua state, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 26: 87-106. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.554>
- Vicas, S. I., Laslo, V., Pantea, S., & Bandici, G.E. (2010). Chlorophyll and carotenoids pigments from Mistletoe (*Viscum album*) leaves using different solvents. *Analele Universitatii din Oradea, Fascicula Biologie*, 17(2), 213-218. <https://bioresearch.ro/2010-2/213-218%20-%20VICAS%20S.I.%20-%20U.O.Prot.Med.Ro.%20-%20Chlorophyll%20and%20carotene.pdf>
- Xiang, J., Yang, C., Beta, T., Liu, S., & Yang, R. (2019). Phenolic profile and antioxidant activity of the edible tree peony flower and underlying mechanisms of preventive effect on H₂O₂-induced oxidative damage in caco-2 cells. *Foods* 8(10): 471. <https://doi.org/10.3390/foods8100471>
- Yen, G.C., Wu, S.C., & Duh, P.D. (1996). Extraction and identification of antioxidant components from the leaves of mulberry (*Morus alba* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 44(7): 1687-1690. <https://doi.org/10.1021/jf9503725>
- Zhang, H., Wang, M., Yu, G., Pu, J., Tian, K., Tang, X., & Deng, Q. (2023). Comparative analysis of the phenolic contents and antioxidant activities of different parts of two pomegranate (*Punica granatum* L.) Cultivars: 'Tunisia' and 'Qingpi'. *Frontiers in Plant Science* 14: 1265018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1265018>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



Composición química de mezclas de aserrín; y, de madera y corteza de cuatro especies de *Pinus* spp. de Durango, México

Chemical composition of sawdust mixtures, and wood and bark from four *Pinus* spp. species from Durango, Mexico

José Guadalupe Rutiaga-Quiñones¹, Rubén Francisco González-Laredo², Melissa Bocanegra-Salazar³, Jorge Armando Chávez-Simental⁴, Jesús Noel Fregoso-Madueño³ y José Rodolfo Goche-Télles^{3*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Av. Fco. J. Múgica s/n, Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, C.P. 58040, México.

² Instituto Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador 1830, Col. Nueva Vizcaya, Durango, Durango, C.P. 34080, México.

³ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Río Papaloapan s/n, Col. Valle del Sur, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

⁴ Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, González de la Vega, Torre de Institutos, Circuito Universitario, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

*Correspondencia: jgoche@ujed.mx (José Rodolfo Goche Télles)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1912>

Recibido: 23 de abril de 2025; Aceptado: 18 de agosto de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Humberto González Rodríguez

Resumen

El propósito del trabajo fue determinar la composición química básica de mezclas de aserrín procedentes de aserraderos de tres municipios del Estado de Durango (Pueblo Nuevo, Santiago Papasquiario y Tepehuanes), así como, madera y corteza de cuatro especies de pino de importancia económica forestal (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*) para evaluar su potencial para elaboración de biocombustibles densificados. En este material se determinó el pH, contenido de cenizas, sustancias extraíbles, lignina y holocelulosa. En las cenizas se realizó un microanálisis. En la mezcla de aserrín procedentes de los tres municipios se encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de lignina siendo mayor en Pueblo Nuevo (35.53 %) y menor en Tepehuanes (27.57 %), mientras que el contenido de holocelulosa fue similar en los tres municipios. En las cenizas se identificaron nueve elementos químicos, en mayor concentración el Calcio (40.61 %), Potasio (25.94 %) y Magnesio (19.30 %); la muestra procedente de Santiago Papasquiario presentó alto contenido de Silicio (22.33 %). En la madera de los cuatro pinos se

encontraron diferencias estadísticas significativas en el pH y contenido total de sustancias extraíbles, con un valor de 5.34 y 14.64 %, respectivamente, ambas en *P. arizonica*; en cenizas el valor más alto (35 %) lo presentó *P. durangensis*. En las cenizas de madera se identificaron nueve elementos químicos, los más representativos, Calcio (42.91 %) y Potasio (21.89 %) encontrados en *P. arizonica*; en las cenizas de corteza once elementos, el más alto fue Silicio (43.17 %) en *P. arizonica* y Calcio (42.90 %) en *P. cooperi*. No se detectaron metales pesados. El resultado del análisis químico indica que los materiales estudiados tienen potencial de uso como biocombustibles densificados.

Palabras clave: aserrín, cenizas, corteza, extraíbles, holocelulosa, lignina.

Abstract

The purpose of this work was to determine the basic chemical composition of wood sawdust mixtures coming from the sawmills of three municipalities in the state of Durango (Pueblo Nuevo, Santiago Papasquiaro and Tepehuanes), as well as wood and bark of four pine species with important economic value in forestry (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* and *P. engelmannii*) in order to assess its potential for the production of densified biofuels. The pH, ash content, extractable substances, lignin and holocellulose contents were determined through the study and analysis of the mentioned materials. A microanalysis was performed on the ashes. In the sawdust samples from the three municipalities, significant statistical differences were found in the content of lignin being higher in Pueblo Nuevo (35.53 %) and lower in Tepehuanes (27.57 %), meanwhile the content of holocellulose was similar across the three municipalities. In the ash samples, nine chemical elements were identified and those with the highest concentration were Calcium (40.61 %), Potassium (25.94 %), and Magnesium (19.30 %); only samples from Santiago Papasquiaro had a high content of Silicon (22.33 %). In the wood and bark of the four pine species, significant statistical differences were found only in pH and the total content of extractable substances, with a value of 5.34 % and 14.64 %, respectively, both from *P. arizonica*; in the ashes the highest value (35 %) was presented by *P. durangensis*. Nine chemical elements were identified in wood ashes, the most representatives being Calcium (42.91 %) and Potassium (21.89 %) found on *P. arizonica*; and eleven chemical elements in bark ashes, the highest being Silicon (43.17 %) on *P. arizonica* and Calcium (42.90 %) on *P. cooperi*. Heavy metals were not detected. Results of the chemical analysis indicate that the samples studied have potential as raw materials for densified biofuels.

Keywords: sawdust, ash, bark, extractives, holocellulose, lignin

1. Introducción

En México se han reportado 46 especies, tres subespecies y 22 variedades de pinos (Sánchez, 2016), representando el 42 % de las especies del mundo. En el Estado de Durango se encuentran 24 especies de pino y es considerado el principal productor de madera en México; las especies más aprovechadas, debido a su calidad y abundancia son: *Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. engelmannii* y *P. cooperi*, otras especies representativas son *P. leiophylla*, *P. strobiformis* y *P. chihuahuana* (González-Elizondo et al., 2012).

La industria de aserrío es la actividad forestal orientada a la transformación de madera en rollo a

madera aserrada (i.e., tablas, tablones y vigas), se encarga de procesar anualmente alrededor del 70 % de la producción forestal maderable de México. En este proceso de transformación, los coeficientes de aserrío (i.e., porcentaje de conversión de madera en rollo a tabla) oscilan entre 45 y 60 %, lo que origina que cerca del 40 % se convierta en residuos de escaso a nulo valor económico (Ortiz et al., 2016). Existen otros estudios enfocados al análisis de rendimientos y productividad en especies de bosque templado, especialmente para coníferas encontrando valores similares (García et al., 2009; Esteves-Magalhaes et al., 2010; Nájera-Luna et al., 2011; Fuentes-López et al., 2018).

Estos residuos generados en la industria y otros desechos urbanos generalmente son utilizados en procesos químicos modernos de conversión para generar energías alternas, que pudieran sustituir el uso de combustibles fósiles. Además, estos desechos también son susceptibles como materia prima para la producción de múltiples sustancias químicas de gran valor comercial (Cortés-Ortiz, 2011). El aserrín de pino se ha utilizado en la elaboración de dietas para animales (Guerra-Medina et al., 2010), también puede utilizarse como materia prima en industrias de tableros de madera, materiales de construcción ligeros como estantes y techos para casas móviles, como aislante en el sistema de refrigeración y conservación del frío en industrias energéticas, como combustible para producir gas de madera, briquetas, pellets, etc. (Rominiyi et al., 2017). En Durango, existen esfuerzos iniciales para el aprovechamiento de aserrín de madera y corteza, como sustrato en la producción forestal y agrícola, bajo condiciones de invernadero y como material energético menos contaminante, como pellets y briquetas (Fragoso-Madueño et al., 2017).

Dada la poca información que se tiene de los componentes químicos de las maderas mexicanas de pino (Bernabé-Santiago et al., 2013), es preciso incrementar investigaciones sobre el tema. En Durango, a pesar de contar con una gran cantidad de pinos de importancia económica, los trabajos sobre composición química de esta especie es un área poco estudiada, como lo muestran los escasos trabajos reportados en la literatura. En la búsqueda de azúcares fermentables, se realizó un estudio con aserrín de pino proveniente de tres aserraderos de la ciudad de Durango, con los siguientes resultados: carbohidratos totales (55.23 %), lignina (26.58 %), extraíbles (24.41 %) y cenizas (0.68 %) (López-Miranda et al., 2009). También, se determinó la composición química de la madera de tres pinos (*Pinus ayacahuite*, *P. leiophylla* y *P. herrerae*) procedentes de la región de Pueblo Nuevo, Durango (Honorato-Salazar et al., 2016). Otros trabajos reportan información sobre el contenido de sustancias fenólicas, como taninos condensados y sustancia flavonoides, en la corteza de ocho especies de pino, incluidas las de la presente contribución (Rosales-Castro y González-Laredo, 2003). Asimismo, existen reportes sobre la actividad antioxidante de extractos de la corteza (Rosales-Castro et al., 2016; Rosales-Castro et al., 2017) y de las acículas de *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote* (Sáenz-Esqueda et al., 2010). Así, para contribuir al conocimiento químico de los pinos de Durango, en este estudio se ha determinado la composición química básica de mezclas de aserrín procedentes de aserraderos de tres municipios, y de madera y corteza de cuatro especies de pinos de importancia económica forestal (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*) para evaluar su potencial para elaboración de biocombustibles densificados.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El material utilizado en la presente investigación se obtuvo de tres aserraderos ubicados en tres municipios del Estado de Durango. El primero en el municipio de Santiago Papasquiaro, localidad de Nuevo San Diego de Tenzaens en las coordenadas 24°57'17" N y 105°58'28" O; el segundo en el municipio de Pueblo Nuevo, ejido El Brillante, en las coordenadas 23°47'14" N y 105°20'57" O; el tercero en el municipio de Tepehuanes, en la localidad Santa Catarina de Tepehuanes en las coordenadas 25°20'57" N y 105°43'15" O, en el Estado de Durango, México, en los cuales existe una importante actividad industrial forestal.

El material lignocelulósico se recolectó de dos maneras. Por un lado, se tomaron muestras de mezclas de aserrín (madera) de diferentes especies de pino de la tolva del área de procesamiento de un aserradero por cada municipio mencionado. Por otra parte, de un aserradero del municipio de Santiago Papasquiaro, se tomaron muestras de aserrín (madera) y de corteza de especies de pino que fueron previamente identificadas en campo (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*), y cuyas trozas fueron marcadas para identificar cada especie durante el proceso de aserrío. De la sierra principal se tomaron 500 g de aserrín de cada especie de pino y la misma cantidad de corteza fue tomada de la descortezadora.

2.2 Análisis químico

Las muestras recolectadas se dejaron secar al aire libre bajo la sombra, posteriormente fueron molidas en un equipo Wiley y tamizadas. Para el análisis químico se determinó el pH (Sandermann y Rothkamm, 1959), que consistió en medir este valor usando un potenciómetro (marca HANNA, modelo pH 211, Portugal). El contenido de cenizas se determinó mediante calcinación a 550 °C en una mufla (Thermo Scientific, modelo FB1415M, EUA) (UNE-EN 14775, 2010). Las cenizas se analizaron mediante energía dispersiva de rayos X, usando un Microscopio Electrónico de Barrido (marca Jeol, modelo JSM-6400), con 20 kV y 8.5 s de exposición (Téllez-Sánchez et al., 2010). La solubilidad total se determinó mediante extracción Soxhlet con solventes de polaridad creciente (ciclohexano, acetona y metanol; finalmente agua caliente a reflujo), usando en cada caso 6 h de extracción (Mejía-Díaz y Rutiaga-Quiñones, 2008); los solventes de recuperaron en un rotavapor (Heidolph, tipo Laborota 4000, Alemania). En el material libre de sustancias extraíbles se determinó lignina, llevando a cabo una hidrólisis con ácido sulfúrico y ácido bromhídrico (Runkel y Wilke, 1951). Para conocer la cantidad de holocelulosa (celulosas y hemicelulosas) en las muestras libre de extraíbles, se empleó el método Wise (Wise et al., 1946), que brevemente consiste en tratar la muestra con clorito de sodio y ácido acético a 75 °C en baño María. Todos los análisis se realizaron por duplicado, con tres repeticiones, debido a que las normas sugieren que se realicen dos veces los análisis (Rutiaga-Quiñones, et al., 2010).

2.3 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se capturaron en hoja de cálculo Microsoft Excel® versión 2016. Se empleó el software XLSTAT para realizar el análisis de varianza correspondiente de acuerdo al diseño experimental de diseño completamente al azar, de igual manera, se realizó la prueba de comparación de medias por el método de Tukey ($\alpha = .05$) para las propiedades químicas, tomándose como criterio las comparaciones entre municipios para el aserrín únicamente y entre especies para aserrín y corteza.

3. Resultados y discusión

3.1. Composición química del aserrín proveniente de tres municipios

pH

En la Tabla 1, se presentan los valores promedio del pH del aserrín de coníferas procedentes de los tres municipios del Estado de Durango, cuyos valores variaron de 4.78 en Santiago Papasquiario a 5.10 en Pueblo Nuevo, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre las tres localidades.

El pH del aserrín procedente de las tres localidades (Tabla 1) corresponde a un pH ligeramente ácido (Kollmann, 1959), lo cual coincide con valores de pH previamente reportados para aserrín de diferentes especies de pino (Rutiaga-Quñones, 2001; Bernabé-Santiago et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017). Por otro lado, Honorato y Hernández (1998), mencionan que valores bajos de pH en la madera tienen un efecto negativo en los procesos de acabado y en la aplicación de adhesivos; no obstante, Albin (1975), menciona que valores de pH entre 4.0 y 5.5 no influyen en el fraguado de los adhesivos para elaboración de tableros de madera.

Tabla 1. Valores de pH y cenizas para madera de tres municipios del Estado de Durango, México.

Table 1. pH and ash values for wood from three municipalities in the state of Durango, Mexico.

Municipio	pH	Cenizas (%)
Pueblo Nuevo	5.10 $\pm$ 0.04 ^a	0.40 $\pm$ 0.003 ^b
Santiago Papasquiario	4.78 $\pm$ 0.02 ^c	0.90 $\pm$ 0.01 ^a
Tepehuanes	4.97 $\pm$ 0.03 ^b	0.16 $\pm$ 0.001 ^c

Media $\pm$ desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Sustancias inorgánicas (cenizas)

El contenido de sustancias inorgánicas (cenizas) en las muestras de madera es menor del 1.0 %, con una variación entre 0.16 y 0.90 %, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre los

municipios estudiados, en Pueblo Nuevo se presentaron los valores más bajos y en Santiago Papasquiario los valores más altos (Tabla 1). Los resultados se encuentran dentro del rango reportado para maderas de especies de coníferas (Fengel y Wegener, 1984; UNE-EN 14961-1 2011). En general, el rango aquí encontrado está en concordancia con los valores reportados para aserrín de pino (0.27 a 0.95 %) procedente de diferentes sitios del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021). Difieren de los valores entre 0.25 a 0.30 % reportados por Honorato-Salazar et al. (2016), y de los valores entre 0.5 y 2.0 % encontrados en aserrín por Serret-Guach y Giralt-Ortega (2016); lo anterior muestra una gran variabilidad de contenido de cenizas en coníferas.

Microanálisis de las cenizas

En la Tabla 2 se presentan los resultados del microanálisis de las cenizas de la madera. Se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) por elemento químico. El resultado del microanálisis de las cenizas, indica la presencia de nueve elementos químicos, de los cuales destaca la alta concentración de Calcio, Magnesio y Potasio, lo cual coincide cualitativamente con reportes previos que han utilizado la misma técnica (Bernabé-Santiago et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017) y corresponden a los elementos químicos principales presentes en la madera (Fengel y Wegener, 1984). Las muestras procedentes del municipio de Santiago Papasquiario presentaron valores relativamente altos de Silicio (Tabla 2); este elemento químico fue detectado en un rango de 1 181 a 4 182 ppm en muestras de aserrín de pino recolectado en diferentes sitios en el Estado de Durango (Rutiaga-Quiñones et al., 2020).

Tabla 2. Microanálisis de cenizas en muestras de madera por municipio (%).

Table 2. Microanalysis of ash in wood samples by municipality (%).

Elemento	Municipios		
	Pueblo Nuevo	Santiago Papasquiario	Tepehuanes
Sodio	2.90 ± 0.60 ^a	2.08 ± 0.44 ^a	2.21 ± 0.85 ^a
Magnesio	18.57 ± 1.96 ^a	11.05 ± 2.20 ^b	19.30 ± 2.65 ^a
Fósforo	3.81 ± 0.58 ^b	2.88 ± 0.39 ^b	5.40 ± 1.48 ^a
Potasio	12.95 ± 1.95 ^b	11.73 ± 0.720 ^b	25.94 ± 1.08 ^a
Calcio	40.61 ± 1.16 ^a	30.72 ± 4.37 ^b	33.00 ± 4.48 ^b
Manganeso	3.86 ± 0.32 ^a	2.42 ± 0.77 ^b	2.28 ± 0.45 ^b
Aluminio	6.21 ± 0.16 ^a	8.61 ± 0.66 ^a	3.51 ± 0.48 ^b
Azufre	1.68 ± 0.71 ^a	1.79 ± 0.20 ^a	2.45 ± 0.26 ^a
Silicio	8.94 ± 0.98 ^b	22.23 ± 8.05 ^a	5.20 ± 0.60 ^b

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Sustancias extraíbles

Los valores obtenidos de las sustancias extraíbles para madera no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre las localidades de procedencia, a excepción de la extracción acuosa y en el valor total (Tabla 3).

Tabla 3. Valores del rendimiento (%) obtenido de sustancias extraíbles en madera por municipio.

Table 3. Obtained yields (%) of extractable substances in wood by municipality.

Municipio	CH	ACE	MET	AC	T
Pueblo Nuevo	2.50 ± 0.10 ^b	5.28 ± 0.19 ^b	1.01 ± 0.03 ^a	2.44 ± 0.15 ^a	11.23 ± 0.45 ^b
Santiago Papasquiaro	5.43 ± 0.20 ^a	3.46 ± 0.22 ^a	1.28 ± 0.16 ^a	3.49 ± 0.20 ^b	13.66 ± 0.53 ^a
Tepehuanes	5.29 ± 0.36 ^a	3.63 ± 0.36 ^a	1.21 ± 0.10 ^a	2.62 ± 0.17 ^a	13.74 ± 0.38 ^a

CH: ciclohexano, ACE: acetona, MET: metanol, AC: agua caliente, T: rendimiento total.

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

Mediante la secuencia de extracción aplicada se obtuvieron los rendimientos de sustancias extraíbles en las muestras de madera procedentes de las tres localidades (Tabla 3). La suma total varió de 11.23 % (Pueblo Nuevo) a 13.74 % (Tepehuanes). El valor obtenido en las muestras de Pueblo Nuevo es cercano al obtenido en muestras de aserrín de esa misma región (10.3 %); así mismo, el rendimiento obtenido en las muestras de Santiago Papasquiaro es menor al rango reportado para muestras de aserrín de esa misma región (15.1 a 23.4 %), utilizando la misma secuencia de extracción (Chávez-Rosales et al., 2021). Para maderas de pino del municipio de Pueblo Nuevo, se reporta un rendimiento de extractos en etanol-benceno de 3.5 % (*Pinus herrerae*), 4.6 % (*P. leiophylla*) y 12.0 % (*P. ayacahuite*) (Honorato-Salazar et al., 2016).

En relación con los solventes empleados, en general los resultados están dentro del rango reportado para muestras de aserrín del Estado de Durango: para ciclohexano (2.1 a 9.7 %), acetona (3.5 a 8.7 %), metanol (0.5 a 1.6 %) y para agua caliente (1.4 a 4.0 %) (Chávez-Rosales et al., 2021). El rendimiento total de sustancias extraíbles de las muestras de aserrín estudiadas, se encuentran dentro del rango reportado (6.1 a 23.4 %), utilizando la misma extracción secuencial, para muestras de aserrín de pino colectado en diferentes regiones de México (Chávez-Rosales et al., 2021), lo cual coincide con los valores de 1.2 a 18 % reportados por Park et al. (2021) en *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus radiata*, respectivamente.

Lignina y holocelulosa

En la Tabla 4 se muestran los porcentajes de lignina y holocelulosa obtenidos en las muestras de madera de los tres municipios, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) solamente para la lignina.

Tabla 4. Contenido (%) de holocelulosa y lignina en las muestras de madera de los tres municipios.**Table 4.** Holocellulose and lignin content in the wood samples from the three municipalities

Municipio	Lignina	Holocelulosa
Pueblo Nuevo	35.53 ± 0.03 ^b	61.62 ± 0.02 ^a
Santiago Papasquiaro	31.53 ± 0.01 ^a	62.38 ± 0.06 ^a
Tepehuanes	27.57 ± 0.02 ^c	62.57 ± 0.001 ^a

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Contenido de lignina

El resultado de la concentración de lignina en las muestras de madera procedentes de las tres localidades (Tabla 4) se ubica dentro del rango reportado para maderas de coníferas, que es de 25.6 a 39.4 % (Fengel y Wegener, 1984). En un trabajo reciente se reportan valores de lignina que oscilan de 20.5 a 25.8 % para aserrín de pino recolectado en diferentes localidades del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021); coincide con lo reportado por Park et al. (2021), en *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii* quienes encuentran valores de 23 a 39 %, respectivamente. Otro estudio con aserrín recolectado en aserraderos de la ciudad de Durango reporta 26.6 % (López-Miranda et al., 2009), valores menores a los encontrados en el presente trabajo, que concuerdan con los valores de 26.4 a 28.3 % mostrados por Mertoglu y Yilgor (2020), en *Pinus sylvestris* y *P. pinaster*, respectivamente.

Contenido de holocelulosa

El contenido de holocelulosa en las muestras de madera de las tres localidades (Tabla 4), coincide con los resultados de un estudio reciente que reporta valores de 60.1 a 68.7 % en muestras de aserrín de pino recolectadas en diferentes localidades del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021), y de 66.7 a 70.0 % para algunas maderas de pino de la región de Pueblo Nuevo, Durango (Honorato-Salazar et al., 2016). Los resultados obtenidos en las mezclas de aserrín sugieren la aplicación en usos industriales derivados de lignina y holocelulosa (Apolinar et al., 2024).

3.2. Composición química de la madera (aserrín) y corteza de cuatro especies de pino

Valores de pH

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio para pH en las muestras de madera y corteza, donde se observaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre las especies estudiadas. En la madera, el pH más alto (5.34) se presentó en *Pinus arizonica*, mientras que en *P. engelmannii*, se ubicó el valor más bajo (4.74). En la corteza, *P. engelmannii*, mostró el valor más alto (5.07), mientras que el más bajo (3.48), se encontró en *P. arizonica*.

Tabla 5. Valores de pH, ceniza en madera y corteza de las especies de *Pinus* estudiadas.**Table 5.** pH values, ash in wood and bark from the *Pinus* species studied.

Especie	Madera		Corteza	
	pH	Cenizas (%)	pH	Cenizas (%)
<i>P. arizonica</i>	5.34 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	3.48 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.001 ^a
<i>P. cooperi</i>	5.15 ± 0.04 ^b	0.24 ± 0.003 ^a	4.07 ± 0.12 ^b	0.39 ± 0.03 ^a
<i>P. durangensis</i>	5.12 ± 0.06 ^b	0.35 ± 0.001 ^a	4.95 ± 0.05 ^a	0.48 ± 0.002 ^a
<i>P. engelmannii</i>	4.74 ± 0.06 ^c	0.34 ± 0.001 ^a	5.07 ± 0.01 ^a	0.27 ± 0.01 ^a

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Los resultados del pH (Tabla 5) para el aserrín de las cuatro especies de pino son ligeramente mayores a los valores encontrados en las tres localidades (Tabla 1), pero también corresponden a pH ligeramente ácido (Kollmann, 1959); en cambio, los valores de pH para la corteza de estas especies de pino (Tabla 5), son ligeramente más bajos que los resultados obtenidos para aserrín, lo que coincide con la literatura (Fengel y Wegener, 1984).

Estudios previos han reportado valores de pH en madera para algunas especies de pino procedentes del estado de Michoacán: *Pinus leiophylla* (4.2), *P. michoacana* (4.0), *P. montezumae* (4.4), *P. oocarpa* (4.0), *P. teocote* (4.1) (Bernabé-Santiago et al., 2013), y *Pinus leiophylla* (4.09), *P. montezumae* (4.06), *P. pseudostrobus* (4.04) (Pintor-Ibarra et al., 2017); estos resultados son ligeramente más bajos a los obtenidos en este estudio, pero igualmente se trata de maderas con pH ligeramente ácido. Es conocido que la variación del pH entre especies de coníferas se debe principalmente a la presencia de grupos ácidos y ácidos libres (Choon y Roffael, 1990). La acidez de la madera es una característica que pudiera limitar su uso, debido a que el pH podría afectar las interacciones entre ciertos metales ya que causan corrosión (Bernabé-Santiago et al., 2013). Se sabe que el pH también puede contribuir a varios problemas en diferentes procesos: adhesión durante el proceso de engomado; fijación de sustancias preservantes; fabricación de aglomerados y durante el proceso de pulpeo (Ávila-Calderón y Rutiaga-Quñones, 2015).

Sustancias inorgánicas (cenizas)

El contenido de sustancias inorgánicas en madera varió de 0.24 % en *Pinus cooperi* a 0.35 % en *P. durangensis* (Tabla 5), mientras que en corteza los valores oscilaron de 0.21 % en *P. arizonica* a 0.48 % en *P. durangensis*; en ambos materiales los valores fueron menores a 1.0 %. No se encontraron diferencias significativas ($p \leq .05$) entre especies. El contenido de cenizas encontrado para tres pinos del municipio de Pueblo Nuevo, Durango es el siguiente: *Pinus ayacahuite* (0.27 %), *P. herrerae* (0.30 %) y *P. leiophylla* (0.25 %) (Honorato-Salazar et al., 2016). Para maderas procedentes del Estado de Michoacán, reportan los siguientes valores de material inorgánico: *Pinus leiophylla* (0.30 %), *P. montezumae* (0.22 %) y *P. pseudostrobus* (0.24 %) (Correa-Méndez et al., 2014), coincide también con aserrín de pino proveniente de Cuba, con valores entre 0.22 y 0.40 % (Pérez-Vinent et al., 2022). La cantidad de cenizas influye en la calidad de los biocombustibles densificados (Obemberger y Thek, 2004). Los pellets y las briquetas se clasifican considerando la cantidad de cenizas (Gutiérrez-Acosta et al., 2021), mediante la norma ISO 17225-2 (ISO 2014) para pellets que incluye las siguientes clases clase A1 (≤ 0.70 %); clase A2 (≤ 1.5 %) y clase B (≤ 3.0 %) y la norma ÖNORM 7135 (ÖNORM, 2000)

para briquetas, en la cual se requiere un contenido menor a 0.50 %. Con lo anterior, se puede sugerir que la madera y la corteza de las cuatro especies estudiadas podrían producir pellets de clase A1 y briquetas, coincidiendo con el estudio donde se reportan las características y propiedades de briquetas elaboradas con aserrín de *Pinus* spp. procedente de cinco regiones de México (Ramírez-Ramírez et al., 2021).

Por otra parte, es conocido que en la corteza suele ser mayor la concentración de sustancias inorgánicas en comparación con la madera (Fengel y Wegener, 1984), sin embargo, en el presente trabajo correspondiente a las cuatro especies de pino, no se aprecia este comportamiento, a excepción de *Pinus cooperi* y *P. durangensis* (Tabla 5).

Microanálisis de las cenizas

La Tabla 6 muestra los resultados del microanálisis de las cenizas de madera y de corteza para las cuatro especies de pino, observando diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) por elemento químico. El resultado del microanálisis de las cenizas del aserrín proveniente de las cuatro especies de pino indica la presencia de nueve elementos químicos, de los cuales, Calcio, Potasio y Magnesio son los que se presentan en mayor proporción (Tabla 6). Utilizando la misma técnica, se han reportado resultados cualitativos similares para aserrín y viruta de especies de pinos procedentes del Estado de Michoacán (*Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*) (Correa-Méndez et al., 2014), y para madera de *Pinus leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. oocarpa* y *P. teocote* (Bernabé-Santiago et al., 2013), y de *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pintor-Ibarra et al., 2017).

En las muestras de corteza de las cuatro especies de pino, se identificaron los mismos elementos químicos detectados en las muestras de aserrín, y adicionalmente se detectaron Hierro y Titanio; por este mismo método se detectó Hierro en la corteza de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus*, y el Titanio sólo se identificó en la corteza de *Pinus pseudostrobus* (Pintor-Ibarra et al., 2017). Los resultados del microanálisis en las muestras de cenizas de las cortezas coinciden cualitativamente, usando la misma técnica, con datos reportados previamente para cortezas de diferentes especies de pino (Correa-Méndez et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017).

Sustancias extraíbles

En la Tabla 7 se presentan los resultados del contenido de sustancias extraíbles en madera de las cuatro especies de pino, por la secuencia de extracción aplicada; y al final se da la suma total. Los resultados para la corteza aparecen en la Tabla 8. En ambos casos se observan diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$).

Tabla 6. Microanálisis elemental de cenizas en madera y corteza de las cuatro especies de pino (%).
Table 6. Elemental microanalysis of ash in wood and bark of the four pine species (%).

Elemento	Madera				Corteza			
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cooperi</i>	<i>P. durangensis</i>	<i>P. engelmannii</i>	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cooperi</i>	<i>P. durangensis</i>	<i>P. engelmannii</i>
Sodio	3.76 ± 0.37 ^a	2.37 ± 0.66 ^a	2.81 ± 0.99 ^a	2.66 ± 0.51 ^a	2.84 ± 0.78 ^a	1.78 ± 0.54 ^b	1.49 ± 0.23 ^b	1.42 ± 0.38 ^b
Magnesio	16.85 ± 1.31 ^a	17.57 ± 1.04 ^a	17.73 ± 1.64 ^a	15.00 ± 1.68 ^a	2.12 ± 0.29 ^b	8.23 ± 0.99 ^a	2.43 ± 0.39 ^b	2.66 ± 0.64 ^b
Fósforo	2.56 ± 0.12 ^c	2.76 ± 0.12 ^b	3.44 ± 0.46 ^a	3.29 ± 0.12 ^a	1.87 ± 0.07 ^b	2.34 ± 0.06 ^b	2.15 ± 0.30 ^b	3.19 ± 0.52 ^a
Potasio	21.89 ± 1.08 ^a	19.93 ± 2.85 ^a	16.87 ± 0.92 ^a	17.10 ± 1.62 ^a	5.84 ± 0.36 ^b	10.31 ± 0.84 ^a	5.52 ± 1.07 ^b	5.92 ± 0.41 ^b
Calcio	42.91 ± 3.08 ^a	37.67 ± 1.25 ^a	41.77 ± 4.49 ^a	37.90 ± 2.35 ^a	20.23 ± 1.88 ^b	42.90 ± 2.13 ^a	35.42 ± 8.88 ^a	38.07 ± 4.18 ^a
Manganeso	6.48 ± 0.29 ^a	5.02 ± 0.51 ^b	4.71 ± 0.55 ^b	3.72 ± 0.32 ^c	Nd	0.62 ± 0.03	Nd	Nd
Aluminio	2.23 ± 0.70 ^c	7.52 ± 1.37 ^a	5.22 ± 0.49 ^b	6.41 ± 0.89 ^a	17.85 ± 0.48 ^a	14.05 ± 0.80 ^c	15.76 ± 0.84 ^b	12.57 ± 1.02 ^c
Azufre	1.71 ± 0.81 ^b	1.83 ± 0.28 ^b	3.14 ± 0.19 ^a	3.52 ± 1.02 ^a	0.96 ± 0.14 ^b	2.33 ± 0.353 ^a	1.15 ± 0.21 ^b	2.44 ± 0.25 ^a
Silicio	2.08 ± 0.28 ^c	4.44 ± 0.87 ^b	4.27 ± 0.67 ^b	8.92 ± 0.68 ^a	43.17 ± 1.84 ^a	13.70 ± 1.282 ^c	32.05 ± 6.80 ^b	29.96 ± 4.39 ^b
Titanio	Nd	Nd	Nd	Nd	0.57 ± 0.05 ^a	0.78 ± 0.355 ^a	0.47 ± 0.12 ^a	0.48 ± 0.05 ^a
Hierro	Nd	Nd	Nd	Nd	4.52 ± 0.23 ^a	2.58 ± 0.333 ^b	3.39 ± 0.48 ^b	3.26 ± 0.28 ^b

Nd=no detectado

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma fila para madera y corteza por separado indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

Tabla 7. Contenido (%) de sustancias extraíbles en madera de las cuatro especies de pino.

Table 7. Yields (%) of extractable substances in wood of the four species of pine.

Especie	Madera				
	CH	ACE	MET	AC	T
<i>P. arizonica</i>	5.38 ± 0.25 ^b	2.99 ± 0.03 ^b	1.83 ± 0.15 ^a	4.43 ± 0.36 ^b	14.64 ± 0.44 ^a
<i>P. cooperi</i>	4.50 ± 0.10 ^b	5.49 ± 0.31 ^a	1.09 ± 0.07 ^b	2.44 ± 0.15 ^a	13.51 ± 0.02 ^b
<i>P. durangensis</i>	3.29 ± 0.37 ^a	6.41 ± 0.09 ^c	0.98 ± 0.03 ^b	1.62 ± 0.17 ^c	12.30 ± 0.24 ^b
<i>P. engelmannii</i>	2.32 ± 0.42 ^a	5.63 ± 0.23 ^a	1.08 ± 0.05 ^b	2.62 ± 0.17 ^a	11.65 ± 0.55 ^c

CH: ciclohexano, ACE: acetona, MET: metanol, AC: agua caliente, T: total.

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

Para el caso de las muestras de madera de las cuatro especies de pino (Tabla 7), el rendimiento total de sustancias extraíbles varió de 11.65 % (*P. engelmannii*) a 14.64 % (*P. arizonica*). Estos valores son mayores a los encontrados en algunas maderas de pino procedentes del Estado de Michoacán: *Pinus leiophylla* (8.2 %), *P. michoacana* (8.1 %), *P. montezumae* (7.6 %), *P. oocarpa* (8.0 %) y *P. teocote* (8.2 %) (Bernabé-Santiago et al., 2013), *Pinus leiophylla* (7.1 %), *P. montezumae* (6.7 %) y *P. pseudostrobus* (6.6 %) (Pintor-Ibarra et al., 2017). Es conocido que factores como localización geográfica, condiciones de crecimiento, material utilizado, así como la edad de los árboles, entre otros, pueden afectar la concentración de sustancias extraíbles (Fengel y Wegener, 1984), además del método de extracción y solvente empleado (Trugilho et al., 2020). El alto contenido de sustancias extraíbles que presenta la madera de *Pinus arizonica* es probable que muestre una alta durabilidad natural (Rutiaga-Quñones, et al., 2010).

Tabla 8. Contenido (%) de sustancias extraíbles en corteza de las cuatro especies de pino.

Table 8. Yields (%) of extractable substances in bark of the four pine species.

Especie	Corteza				
	CH	ACE	MET	AC	T
<i>P. arizonica</i>	1.38 ± 0.25 ^a	2.77 ± 0.25 ^a	8.51 ± 0.10 ^a	4.84 ± 0.10 ^a	17.50 ± 0.38 ^a
<i>P. cooperi</i>	1.37 ± 0.15 ^a	3.04 ± 0.07 ^b	8.30 ± 0.05 ^a	1.60 ± 0.38 ^b	14.31 ± 0.49 ^b
<i>P. durangensis</i>	1.79 ± 0.15 ^a	2.60 ± 0.27 ^a	8.31 ± 0.23 ^a	4.87 ± 0.17 ^a	17.57 ± 0.47 ^a
<i>P. engelmannii</i>	1.57 ± 0.23 ^a	2.46 ± 0.31 ^a	6.38 ± 0.47 ^b	3.43 ± 0.15 ^c	13.85 ± 0.70 ^b

CH: ciclohexano, ACE: acetona, MET: metanol, AC: agua caliente, T: total.

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

En cuanto al rendimiento de sustancias extraíbles en las muestras de corteza de los pinos, los valores encontrados variaron de 13.85 % (*P. engelmannii*) a 17.57 % (*P. durangensis*) (Tabla 8). Los valores en corteza (Tabla 8) fueron mayores a los obtenidos en madera para las mismas especies de pino (Tabla 7), lo que coincide con la literatura, en el sentido de que la corteza contiene mayor concentración de sustancias extraíbles en comparación con la madera (Fengel y Wegener, 1984). Los resultados de este

trabajo se ubican dentro de los valores obtenidos en cortezas de pinos michoacanos: *Pinus leiophylla* (9.7 %), *P. montezumae* (10.3 %) y *P. pseudostrobus* (17.1 %), utilizando la misma secuencia de extracción (Pintor-Ibarra et al., 2017).

La corteza destaca por la presencia de metabolitos secundarios, siendo los principales compuestos fenólicos y terpenos, en comparación con la madera (Alonso-Esteban et al., 2022). En las cortezas de las especies de pino aquí estudiadas, se ha reportado la presencia de compuestos fenólicos, con valores de 13 al 16 % de taninos condensados y con potencial de uso en biomedicina (Rosales-Castro y González-Laredo, 2003). También, se han realizado estudios sobre la capacidad antioxidante de los extractos polifenólicos de las cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmanni*, *P. leiophylla* y *P. teocote*, con alto potencial fitoquímico (Rosales-Castro et al., 2016).

Lignina y holocelulosa

La Tabla 9 resume los resultados del contenido de lignina y de holocelulosa en las muestras de aserrín y de corteza de las cuatro especies de pino estudiadas, sin diferencia estadística significativa entre especies, para madera y corteza. La corteza presenta resultados porcentuales de lignina, ligeramente por debajo de la holocelulosa, coincidiendo con lo reportado en coníferas europeas por Fengel y Wegener (1984), holocelulosa de 51.6 a 65.3 % y lignina, de 37.8 a 44.7 %. Miranda et al. (2012), reportan valores en *Picea abies* y *Pinus silvestris* para lignina (27.9 y 33.7 %) y holocelulosa (42.7 y 37.6 %), respectivamente. Sin embargo, difieren de lo encontrado por Barros et al. (2023) en *Pinus pinaster*, quienes reportan 46.09 % para holocelulosa y 51.15 % para lignina. La diferencia entre los resultados de contenido de holocelulosa y lignina pueden ser atribuidos a que los métodos estándar utilizados para analizar la madera pueden no ser los adecuados para la corteza debido a la interferencia cruzada entre sus componentes, como los polifenoles y la suberina (Miranda et al., 2012).

Tabla 9. Contenido (%) de holocelulosa y de lignina de las cuatro especies de *Pinus*.

Table 9. Holocellulose and lignin content (%) of the four *Pinus* species.

Especie	Madera		Corteza	
	Lignina	Holocelulosa	Lignina	Holocelulosa
<i>P. arizonica</i>	29.82 ± 0.01 ^a	66.16 ± 0.01 ^a	42.74 ± 0.01 ^a	48.87 ± 0.02 ^a
<i>P. cooperi</i>	31.53 ± 0.003 ^a	63.61 ± 0.002 ^a	43.66 ± 0.06 ^a	45.71 ± 0.08 ^a
<i>P. durangensis</i>	34.72 ± 0.01 ^a	60.93 ± 0.002 ^a	43.28 ± 0.09 ^a	41.38 ± 0.13 ^a
<i>P. engelmannii</i>	33.73 ± 0.04 ^a	62.65 ± 0.02 ^a	46.60 ± 0.001 ^a	46.74 ± 0.004 ^a

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Contenido de lignina

El resultado del contenido de lignina en las muestras de madera de las cuatro especies de pino (Tabla 9), se ubica dentro del rango reportado para maderas de coníferas, que es de 25.6 a 39.4

% (Fengel y Wegener, 1984). Investigaciones previas dan a conocer contenidos de lignina para diferentes especies de pino, que van de 24.0 a 28.5 % (Bernabé-Santiago et al., 2013), de 26.3 a 28.6 % (Honorato-Salazar et al., 2016), de 29.6 a 32.5 % (Pintor-Ibarra et al., 2017) y de 25.61 a 31.89 % en *Pinus patula* (Apolinar, 2024). Es conocido que la variación existente en la composición química puede estar influenciada por factores geográficos, condiciones de crecimiento, edad de los árboles, entre otros (Hon y Shiraishi, 2001; Mevanarivo, 2020), además del método de extracción (Chávez-Sifontes y Domine, 2013; Wang et al., 2022).

Los resultados de las cortezas indican valores mayores a los obtenidos para madera (Tabla 9), y están en el límite inferior del rango estimado para coníferas europeas (37.8 a 44.7 %) (Fengel y Wegener, 1984). Es conocido que en la corteza hay alta concentración de taninos condensados (Alonso-Esteban, et al., 2022). Alta concentración de estos fenólicos en la corteza representa un atractivo potencial como agente bioactivos y antioxidantes (Rosales-Castro y González-Laredo, 2003), además, los compuestos tánicos condensables a partir de residuos de corteza de *Pinus spp* se utilizan en la producción de adhesivo (Gonçalves et al., 2021).

Contenido de holocelulosa

La cantidad de holocelulosa en las muestras de las cuatro especies de pino (Tabla 9), coincide con los resultados de un estudio reciente que reporta valores de 60.1 a 68.7 % en muestras de aserrín de pino recolectadas en diferentes localidades del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021). En general, los resultados aquí obtenidos concuerdan con datos previamente reportados de 64.5 a 67.3 % para maderas de pino del Estado de Michoacán (Morales-Máximo et al., 2021), de 63.6 a 67.4 % para maderas mexicanas de pino de la subsección cembroides (Revilla-González, 2011) y de 65.43 a 71.08 % en *Pinus patula* (Apolinar, 2024).

Con relación al contenido de holocelulosa en la corteza de las cuatro especies de pino (Tabla 9), los resultados obtenidos son claramente menores a los valores encontrados para la madera de estas especies (Tabla 9), y esto coincide con el hecho de que la corteza tiene baja concentración de polisacáridos en comparación con la madera (Fengel y Wegener, 1984). Valores de holocelulosa encontrados en la corteza de *Pinus leiophylla* (47.7 %), *P. montezumae* (48.3 %) y *P. pseudostrobus* (45.8 %) procedentes del Estado de Michoacán (Pintor-Ibarra et al., 2017), son cercanos a los resultados obtenidos en el presente estudio y para *Pinus sylvestris* se ha dado a conocer un valor de 54.6 % (Fengel y Wegener, 1984), ligeramente mayor a los aquí obtenidos.

4. Conclusiones

En la mezcla de aserrín procedente de los tres municipios del Estado de Durango, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < .05$) en contenido de lignina, con los valores más altos en Pueblo Nuevo (35.53 %) y los más bajos en Tepehuanes (27.57 %). Con respecto a la holocelulosa, no presentó diferencias significativas entre los municipios. En las muestras de cenizas se identificaron nueve elementos químicos, los de mayor concentración fueron Calcio (30.72 a 40.61 %), Potasio (11.73 a 25.94 %) y Magnesio (11.05 a 19.30 %), sólo la muestra procedente de Santiago Papasquiaro presentó alto contenido de Silicio (22.23 %). En madera y corteza de las cuatro especies de pino estudiadas se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < .05$) solamente en el pH,

microanálisis y contenido total de sustancias extraíbles. En las cenizas de madera se identificaron nueve elementos químicos y once en las de corteza. No se detectaron metales pesados. Los resultados del análisis químico en particular el contenido de cenizas en la mezcla proveniente de Tepehuanes y Pueblo Nuevo, indican que son aceptables para producir pellets clase A1, al igual que las cuatro especies de pino, mientras que la mezcla de Santiago Papasquiaro genera pellets clase A2. En general, el material analizado en este trabajo, pueden ser utilizado como biocombustibles densificados (pellets y briquetas). Por último, se recomienda para futuras investigaciones incluir el poder calorífico.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización J.N.F.M. y J.R.G.T.; metodología, J.R.G.T., J.G.R.Q., y R.F.G.L.; análisis formal, J.N.F.M., J.A.Ch. S., y J.G.R.Q.; investigación, J.N.F.M., J.R.G.T., J.G.R.Q., y M.B.S.; recursos, J.N.F.M., J.R.G.T., J.G.R.Q. y J.A.Ch. S.; conservación de datos, J.R.G.T. y J.G.R.Q.; redacción-redacción del borrador original, J.N.F.M. y J.R.G.T.; redacción-revisión y edición, J.G.R.Q., R.F.G.L. y J.R.G.T.; visualización, M.B.S. R.F.G.L., J.A.Ch. S., J.G.R.Q. y J.R.G.T.; supervisión, J.G.R.Q. y J.R.G.T.; administración del proyecto, J.N.F.M. y J.R.G.T. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de los aserraderos de los ejidos y empresas forestales visitados por la donación del aserrín y corteza utilizados en esta investigación.

Conflicto de interés

Este documento se elaboró con fines académicos y científicos, por lo que no existe ningún conflicto de intereses por parte de los autores, en la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Albin, A., R. (1975). Determinación del pH en diversas especies de los renovales de la provincia de Valdivia. *Bosque*, 1(1), 3-5. <https://doi.org/10.4206/bosque.1975.v1n1-02>
- Alonso-Esteban, J. I., Caroch, M., Barros, D., Vaz Velho, M., Heleno, S., & Barros, L. (2022). Chemical composition and industrial applications of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) bark and other non-wood parts. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21, 583-633. <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09624-1>
- Apolinar, H., F., Honorato-Salazar, J.A., & Colotl, H., G. (2024). Lignocellulosic characterization of *Pinus patula* wood from Oaxaca, Mexico. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(4): e73759. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n4-004>

- Ávila-Calderón, L. E., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Wood chemical components of three species from a medium deciduous forest. *Wood Research*, 60(3), 463-469. <http://www.woodresearch.sk/wr/201503/12.pdf>
- Barros, D., Fernandes, E., Jesus, M., Barros, L., Alonso-Esteban, J. I., Pires, P., & Vaz Velho, M. (2023). The chemical characterisation of the maritime pine bark cultivated in Northern Portugal. *Plants*, 12(23): 3940. <https://doi.org/10.3390/plants12233940>
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques*, 19(2): 21-35. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>
- Chávez-Rosales, J. S., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Basic chemical composition of *Pinus spp.* sawdust from five regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources*, 16(1): 816-824. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.816-824>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-4-nro-4-ano-2013-articulo-3/>
- Choon, K. K., & Roffael, E. (1990). The acidity of five hardwood species. *Holzforschung*, 44(1): 53-58. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1990.44.1.53>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2013). Humedad, ceniza e inorgánicos en corteza industrial de tres pinos para bioenergía. *Revista Forestal Baracoa*, 32(2): 77-83.
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 77-88. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.012>
- Cortés-Ortiz, W. G. (2011). Materiales lignocelulósicos como fuente de biocombustibles y productos químicos. *Revista de Ciencia y Tecnología Aeronáutica*, 16: 41-46. <https://es.scribd.com/document/408543377/Materiales-Lignocelulosicos>
- Esteves-Magalhaes, W. L., Bolzon de Muniz, G. I., Lomeli-Ramírez, M. G., & Cesar-Batista, D. (2010). Estudio de la productividad de corte en madera de *Pinus elliottii* utilizando un prototipo de aserradero portátil. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 12(1): 43-52. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/1380>
- Fragoso-Madueño, J. N., Goche-Télles, J. R., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Laredo, R. F., Bocanegra-Salazar, M., & Chávez-Simental, J. A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2): 243-260. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- Fengel, D., & Wegener, G. (Eds.) (1984). Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Germany: Walter de Gruyter & Co., Berlín. 626 pp.

- Fuentes-López, M. E., Suárez-Patlán, E. E., Carrillo-Ávila, N., & Flores-Velázquez, R. (2018). Coeficiente de aprovechamiento en un aserradero ejidal del estado de Puebla. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 4(14), 32-38. https://www.researchgate.net/publication/390463937_Coeficiente_de_aprovechamiento_en_un_aserradero_ejidal_del_estado_de_Puebla
- García Delgado, J. M., Izquierdo Chala, O., Henry Torriente, P. P., & Domínguez Goizueta, A. (2009). Algunos aspectos relacionados con la calidad de la madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*. *Revista Ra Ximhai*, 5(3): 259–270. <https://doi.org/10.35197/rx.05.03.2009.01.jg>
- Gonçalves, F. G., Chaves, I. L. S., Fassarella, M. V., Brito, A. S., Silva, E. S. G. da, López, Y. M., & Oliveira, R. E. G. de. (2021). Extracción de taninos de la corteza de *Pinus spp* tratada térmicamente – aplicación como adhesivo. *Madera y Bosques*: 27(1), e2712041. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712041>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, (100): 351-403. <https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40>
- Guerra-Medina, C. E., Cobos-Peralta, M. A., Montañez-Valdez, O. D., & Pérez-Sato, M. (2010). Uso de aserrín de pino (*Pinus patula*) como fuente de fibra en dietas para borregos en cebo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3): 667-673. <https://www.revista.coba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/426>
- Gutiérrez-Acosta, J. M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J. J., Ruíz-Aquino, F., Navarrete-García, M. A., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). On the basic chemical composition of selected biomass types from four regiones of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources*, 16(3): 5694-5705. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5694-5705>
- Honorato-Salazar, J. A., Apolinar-Hidalgo, F., & Colotl-Hernández, G. (2016). Composición lignocelulósica de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. leiophylla* Schlecht. & Cham. y *P. herrerae* Martínez. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34): 47-56. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.82>
- Honorato-Salazar, J. A., & Hernández-Pérez, J. (1998). Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques*, 4(2): 79-93. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421361>
- Hon, D. N.-S., & Shiraishi, N. (Eds) (2001). Wood and Cellulose Chemistry, Marcel Dekker, New York, USA. 928 pp. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00147-1)
- ISO 17225-2 2014. Solid biofuels – Fuel specifications and classes, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Kollmann, F. (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera.
- López-Miranda, J., Soto-Cruz, N. O., Rutiaga-Quiñones, O. M., Medrano-Roldán, H., & Arévalo-Niño, K. (2009). Optimización del proceso de obtención enzimática de azúcares fermentables a partir de aserrín de pino. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2): 95-102. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/21586>

- Mejía-Díaz, L. A., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2008). Chemical composition of *Schinus molle* L. wood and kraft pulping process. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(2): 145-149. http://www.rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol%207%20no%202/RMIQ_6.pdf
- Mertoglu Elmas, G., & Yilgor, N. (2020). Chemical and thermal characterizations of *Pinus sylvestris* and *Pinus pinaster*. *BioResources*, 15(2), 3604-3620. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/chemical-and-thermal-characterizations-of-pinus-sylvestris-and-pinus-pinaster/>
- Mevanarivo, Z. E., Ramanantoandro, T., Tomazello-Filho, M., Napoli, A., Razafimahatratra R, A., Razakamanarivo, H. R., & Chaix, G. (2020). Variability in the physic-chemical properties of wood from *Eucalyptus robusta* depending on ecological growing conditions and forestry practices: the case of Smallholdings in the highlands of Madagascar. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 22(4): 425–438. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/4136>
- Miranda, I., Gaminho, J., Mirra, I., & Pereira, H. (2012). Chemical characterization of barks from *Picea abies* and *Pinus sylvestris* into different particle sizes. *Industrial Crops and Products*, 36(1): 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.035>
- Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of *Pinus spp.* as an energy resource for the production of solid biofuels in an Indigenous Community in Mexico. *Forests*, 12(8): 977. <https://doi.org/10.3390/f12080977>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas J. J., & Vargas-Larreta, B. (2011). Tiempos y rendimientos del aserrío en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2): 199-213. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.034>
- Obemberg, I., & Thek, G. (2004). Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6): 653-669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- ÖNORM M 7135. (2000). Compressed Wood or compressed bark in natural state pellets and briquettes, requirements and test specification, Österreichisches Normungsinstitut [Austrian Standard Institute], Vienna, Austria. <https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-c-4006-2013-02-15-p1989414>
- Ortiz B., R., Martínez, S., Vázquez R., D., & Juárez, W. (2016). Determinación del coeficiente y calidad de aserrío del género *Pinus* en la región Sierra Sur, Oaxaca, México. *Colombia Forestal*, 19(1): 79-94. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a06>
- Park, S. Y., Kim, J. H., Kim, J. C., Yang, S. Y., Yeo, H., & Choi, I. G. (2021). Classification of softwoods using wood extract information and near infrared spectroscopy. *BioResources*, 16(3): 5301-5312. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.3.5301-5312>
- Pérez-Vinent, A. R., Serret-Guasch, N., & Penedo-Medina, M. (2022). Caracterización de la biomasa vegetal aserrín de pino. *Tecnología Química*, 42(3): 556-573. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5279>
- Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber by-products from *Pinus leiophylla*, P.

- montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetics use. *Wood Research*, 62(6): 849-862. <https://www.woodresearch.sk/cms/physical-and-chemical-properties-of-timber-by-products-from-pinus-leiophylla-p-montezumae-and-p-pseudostrobus-for-a-bioenergetics-use/>
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus spp.* sawdust from five regions of Mexico. *BioResources*, 16(2), 2249-2263. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.2.2249-2263>
- Revilla-González, E. (2011). Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección cembroides. (Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo).
- Rominiyi, O., Adaramola, B., Ikumapayi, O., Oginni, O., & Akinola, S. (2017) Potential utilization of sawdust in energy, manufacturing and agricultural industry; waste to wealth. *World Journal of Engineering and Technology*, 5(3): 526-539. <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.53045>
- Rosales-Castro, M., & González-Laredo, R. F. (2003). Comparación del contenido de compuestos fenólicos en la corteza de ocho especies de pino. *Madera y Bosques*, 9(2): 41-49. <https://doi.org/10.21829/myb.2003.921285>
- Rosales-Castro, M., González-Laredo, R. F., Rivas-Arreola, M. J., & Karchesy, J. (2017). Chemical analysis of polyphenols with antioxidant capacity from *Pinus durangensis* bark. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 37(5): 393-404. <http://dx.doi.org/10.1080/02773813.2017.1310898>
- Rosales-Castro, M., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Peralta-Cruz, J., & Karchesy, J. J. (2016). Evaluación química y capacidad antioxidante de extractos polifenólicos de cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. *Madera y Bosques*, 15(3): 87-105. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1531187>
- Runkel, R. O. H., & Wilke, K. D. (1951). Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 9: 260-270. <https://doi.org/10.1007/BF02617370>
- Rutiaga-Quiñones, J. G. (2001). Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Technische Universität München, 210 pp. Buchverlag Gräffelfing, Germany.
- Rutiaga-Quiñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J., & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4): 8529-8553. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Rutiaga-Quiñones, J. G., Pedraza-Bucio, F. E., & López-Albarrán, P. (2010). Componentes químicos principales de la madera de *Dalbergia granadillo* Pittier y de *Platymiscium lasiocarpum* Sandw. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2): 179-186. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.023>
- Sáenz-Esqueda, M. A., Rosales-Castro, M., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., & González-Laredo, R. F. (2010). Contenido fenólico y acción antioxidante de extractos de acículas de *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. engelmannii* y *P. teocote*. *Madera y Bosques*, 16(3): 37-48. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1631165>

- Sánchez-González, A. (2016). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos en México. *Madera y Bosques*, 14(1): 107-12. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222>
- Sandermann, W., & Rothkamm, M. (1959). Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 17: 433-440. <https://doi.org/10.1007/BF02605386>
- Serret-Guasch, N., Giralt-Ortega, G., & Quintero-Ríos, M. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3): 468-479. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445546669012>
- Téllez-Sánchez, C., Ochoa-Ruiz, H. G., Sanjuán-Dueñas, R., & Rutiaga-Quñones J. G. (2010). Componentes químicos del duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (Leguminosae). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(1): 87-93. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.11.046>
- Trugilho, P. F., Assis, M. R. de, Loureiro, B. A., Simetti, R., Lima, L. V. L., Rodrigues, T. A. F., & Mendes, F. M. (2020). Effect of genetic material and solvent type on the quantification of soluble wood compounds in Eucalyptus clones. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(2): 785–792. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/12398>
- UNE-EN 14775: 2010. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. Asociación Española de Normalización UNE-Normalización Española. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045971>
- UNE-EN 14961-1: 2011. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales. Asociación Española de Normalización UNE-Normalización Española. Madrid, España. <https://en.tienda.aenor.com/norma-une-en-14961-1-2011-n0046855>
- Wang, N., Xu, B., Wang, X., Lang, J., & Zhang, H. (2022). Chemical and structural elucidation of lignin and cellulose isolated using DES from bagasse based on alkaline and hydrothermal pretreatment. *Polymers*, 14(14): 2756. <https://doi.org/10.3390/polym14142756>
- Wise, L. E., Murphy, M., & d'Addieco, A. A. (1946). A chlorite holocellulose, its fraction and bearing on summative wood analysis and on studies on hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122(2), 35-43. <https://www.sid.ir/paper/567136/en>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Métodos de clasificación de datos en SIG para estimar recarga de agua subterránea en México

Data classification methods in GIS for groundwater recharge estimation in Mexico

Miguel Ángel González-Núñez^{1*}, Alejandro Villalobos-Aragón¹, Álvaro Enrique Fernández-Escalante², Nuria Naranjo-Fernández³

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). Circuito Universitario, Campus 2. C. P. 31125. Chihuahua, Chihuahua, México.

²Grupo Tragsa, Subdirección de Innovación, 28006 Madrid, España

³Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España.

*Correspondencia: Correo electrónico: manunez@uach.mx (Miguel Ángel González Núñez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.2020>

Recibido: 21 de julio de 2025; Aceptado: 12 de septiembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Mérida Gutiérrez Ph.D.

Resumen

Este estudio evaluó cinco métodos de clasificación de datos en ArcMap 10.5 para analizar la recarga media anual de agua subterránea en trece regiones hidrológico-administrativas de México. Los datos de recarga ($\text{hm}^3/\text{año}$) fueron obtenidos del Geoportal de CONABIO (2008) y normalizados mediante recarga específica ($\text{mm}/\text{año}$) para permitir comparaciones entre regiones de diferente tamaño. El análisis se basó en intervalo, clase y rango. Se generaron mapas coropléticos aplicando intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales/Jenks e intervalos geométricos, con un máximo de cinco clases. Los resultados evidenciaron diferencias en la representación espacial: los intervalos iguales simplificaron la interpretación (cada clase abarca $4,816 \text{ hm}^3/\text{año}$), pero no reflejaron la concentración de datos bajos; los cuantiles distribuyeron uniformemente los valores, aunque agruparon datos heterogéneos (e.g. $7,566$ y $25,316 \text{ hm}^3/\text{año}$); la clasificación manual, sacrificó el detalle intermedio y muestra solo dos intervalos grandes ($8,000$ y $18,000 \text{ hm}^3/\text{año}$); los intervalos naturales/Jenks y geométricos representaron con mayor precisión la variabilidad y datos sesgados. Se identificaron zonas de alta recarga (Península de Yucatán: $213.2 \text{ mm}/\text{año}$) y baja (Baja California: $8.4 \text{ mm}/\text{año}$). El trabajo concluye que no existe un método ideal único; la elección depende de los objetivos, la naturaleza de los datos y la audiencia. La aplicación combinada de varios métodos mejora la interpretación y apoya una gestión hídrica más informada.

Palabras clave: métodos de clasificación; ArcGIS; clasificación cartográfica; recarga de agua subterránea; México.

Abstract

This study evaluated five data classification methods in ArcMap 10.5 to analyze the mean annual groundwater recharge in thirteen hydrologic-administrative regions of Mexico. Recharge data (hm^3/year) were obtained from CONABIO's Geoportal (2008) and normalized using specific recharge (mm/year) to allow comparisons among regions of different sizes. The analysis was based on interval, class, and range. Choropleth maps were generated using equal intervals, equal frequency/quantiles, manual classification, natural breaks/Jenks, and geometric intervals, with a maximum of five classes. The results revealed differences in spatial representation: equal intervals simplified interpretation (each class covering $4,816\text{hm}^3/\text{year}$) but did not reflect the concentration of low values; quantiles distributed values evenly, although they grouped heterogeneous data (e.g., $7,566$ and $25,316\text{hm}^3/\text{year}$); manual classification sacrificed intermediate detail and displayed only two broad intervals ($8,000$ and $18,000\text{hm}^3/\text{year}$); natural breaks/Jenks and geometric intervals represented variability and skewed data with greater accuracy. Areas of high recharge (Yucatán Peninsula: $213.2\text{mm}/\text{year}$) and low recharge (Baja California: $8.4\text{mm}/\text{year}$) were identified. The study concludes that no single ideal method exists; the choice depends on the objectives, the nature of the data, and the target audience. The combined application of multiple methods enhances interpretation and supports more informed groundwater management.

Keywords: classification methods; GIS; thematic maps; groundwater recharge; Mexico.

1. Introducción

La recarga de acuíferos forma parte del ciclo hidrológico y ocurre desde hace millones de años en zonas de montaña, regiones fracturadas, ríos, arroyos, sitios granulares y homogéneos. Sin embargo, este fenómeno se ha modificado por factores como el cambio climático, alteraciones del ciclo hidrológico, riego agrícola, disposición de aguas residuales tratadas en cuerpos de agua, e impermeabilización de suelos en zonas urbanas (Roger et al., 2011; Moukoko et al., 2023; Asaka et al., 2024; Saraf y Regulwar, 2024). Como resultado de esto, se ha documentado la disminución del nivel estático con efectos indeseables, tales como: incremento del costo de bombeo, subsidencia de terreno, desecación de humedales, pérdida de flujo base, disminución de la calidad del agua subterránea, entre otros (Scanlon et al., 2016). Estos problemas se agravan en zonas áridas, donde el porcentaje de recarga natural de agua subterránea es bajo.

En este contexto, se han realizado estudios que determinan valores de recarga natural considerando factores como tiempo, espacio, clima y geología. Estos estudios demuestran porcentajes de recarga basados en la precipitación: al sur de EUA del 6 al 22 % (Hogan et al., 2004), en Etiopía 20 % (Andualem et al., 2021), en India 17 % (Mohan & Pramada, 2023), en rocas ígneas del 4 al 19 % con altas tasas de infiltración en rocas fracturadas (Cai y Offerdinger, 2016), en climas húmedos del 30 al 50 %, en climas mediterráneos del 10 al 20 % y en climas secos del 0 a 2 % (Bouwer, 2002), en sedimentos, arenas y gravas del 5.6 % al 8.3 %, en calizas y dolomías 34.3 %, en margas, yesos, limos y arcillas 3.3 %, y en rocas duras 1.3 % (Sanz et al., 2011). De estos valores, se desprende que el conocimiento cuantitativo de los valores de recarga forma las bases para la evaluación, desarrollo y utilización óptima del agua subterránea, por lo que se requieren herramientas emergentes para mejorar el entendimiento de los procesos de recarga. Así mismo, los procesos y mecanismos de recarga, factores que los afectan, técnicas precisas y adecuadas para estimar la recarga en tiempo y

espacio, y áreas prioritarias para futuras investigaciones, deben estudiarse con prioridad (Healy y Scanlon, 2010). Dentro de las herramientas emergentes para la gestión y entendimiento de la recarga de agua subterránea se encuentran vuelos con dron, inteligencia artificial, análisis de imágenes satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (en lo sucesivo, SIG).

Un SIG puede definirse como “un sistema computacional que maneja, almacena, analiza y muestra datos geoespaciales” (Chang, 2022). Los SIG, pese a considerarse una herramienta novedosa, tienen más de 50 años en el mercado (Chang, 2022) y factores como internet, GPS y la mejora de rendimiento de los ordenadores han permitido su aplicación a nivel global, incluso por usuarios no especializados fuera del campo de la cartografía (Snyman et al., 2024). Pese a sus múltiples ventajas, los SIG presentan retos, tales como datos inexactos, estructura de datos vectoriales compleja, diferencia de sistemas de coordenadas nativos, datos desactualizados, alto costo del software y falta de estandarización de datos, por mencionar algunos (Paramasivam, 2019). Así, algunos de los principales retos de los SIG se asocian a los datos de entrada y salida que los programas de cómputo proporcionan (Flores-Garnica y Flores-Rodríguez, 2020).

En el caso de México, se han identificado inconsistencias en la información geoespacial utilizada para la gestión de los acuíferos, lo que muestra la necesidad de evaluar y optimizar datos y métodos de clasificación en SIG (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007). También, diversos estudios han reportado las diferencias que arrojan los métodos de clasificación de datos en diversas partes del mundo, aun considerando los mismos archivos de entrada (Chang, 2022; Slocum et al., 2023). Por todo lo anterior, el objetivo de esta investigación fue aplicar cinco métodos de clasificación de datos en el software ArcGIS 10.5 (intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales/Jenks e intervalos geométricos), utilizando los mismos datos (valores de recarga de agua subterránea en México en $\text{hm}^3/\text{año}$), y comparar resultados.

2. Descripción de la zona de estudio

2.1 Ubicación

México se localiza al sur de Norteamérica, entre las coordenadas 32° y 14° Norte y 86° y 118° Oeste. Al norte tiene una frontera de 3,152 km con los Estados Unidos de América, al sur una frontera de 278 km con Belice y de 962 km con Guatemala, extendiéndose al sureste en la región de la Península de Yucatán. La superficie de México es de 1,964,000 km^2 , por lo tanto, a nivel mundial, ocupa el puesto número 13 en cuanto a su extensión territorial. Al este, el país está bordeado por el Golfo de México y el Mar Caribe, mientras que al oeste y al sur se encuentra el Océano Pacífico. El país se divide en 32 entidades federativas.

2.2 Clima

Diversos factores determinan el clima de México. En primer lugar, por su ubicación geográfica, el sur del país se encuentra en la zona intertropical, en tanto que el norte se localiza en la zona templada (México se encuentra a la misma latitud que los desiertos del Sahara y el Árabe). En segundo lugar, los accidentes geográficos caracterizan el relieve de México. Así, los climas áridos y semidesérticos se encuentran en el norte, con temperaturas superiores a 40°C en verano, mientras

que, en las zonas altas del centro del país, el clima es templado, con temperaturas promedio de 15 °C (Lutgens et al., 2018). En zonas costeras del Golfo de México y del Pacífico, predomina el clima cálido-húmedo con altas temperaturas, y en el sureste, el clima es tropical con temperaturas promedio de 24 °C.

En general, en el país prevalecen los climas secos y semisecos, con lluvias de 200 a 500 mm/año (Lutgens et al., 2018). En contraste, el sureste del país tiene un clima tropical húmedo, con lluvias de más de 2,000 mm/año. Las zonas montañosas presentan climas templados con lluvias moderadas y temperaturas frescas durante gran parte del año. En la mayor parte del territorio la lluvia es torrencial en verano, con una media de 740 mm/año, mientras que el 68 % de la precipitación normal mensual es de junio a septiembre (CONAGUA, 2023). En las regiones áridas del norte, la evapotranspiración es alta debido a elevadas temperaturas con tasas superiores a 2,000 mm/año (CONAGUA, 2023). En zonas tropicales y costeras, la evapotranspiración también es elevada debido a la alta humedad y las temperaturas cálidas, aunque las lluvias regulares compensan esta pérdida de agua. En las áreas montañosas, la evapotranspiración es baja debido a las temperaturas moderadas y la presencia de bosques, que actúan como reservorios de agua y contribuyen a la conservación del recurso hídrico. La radiación solar tiene promedios anuales que van de 4 a 6 kWh/m² al día, siendo más intensa en los desiertos del norte debido a la falta de nubosidad, mientras que las regiones tropicales del sur y las áreas montañosas experimentan una radiación solar más moderada debido a la mayor cobertura de nubes y lluvias frecuentes (CONAGUA, 2023).

2.3 Hidrografía

Los ríos y arroyos de México constituyen una red hidrográfica de 633,000 km de longitud, en la que destacan 51 ríos por los que fluye el 87 % del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65 % de la superficie territorial (CONAGUA, 2023). Por su superficie, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por longitud destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma y Nazas-Aguanaval pertenecen a la vertiente interior. México comparte ocho cuencas transfronterizas: tres con Estados Unidos (Bravo, Colorado y Tijuana), cuatro con Guatemala (Grijalva-Usumacinta, Suchiate, Coatán y Candelaria) y una con Belice y Guatemala (río Hondo).

El país se divide en tres regiones hidrológicas: la vertiente del Pacífico, la vertiente del Golfo y el interior sin salida al mar, con más de 700 cuencas hidrológicas en todo el territorio (CONAGUA, 2023). Dentro de estas cuencas, las más importantes incluyen la Cuenca del Río Bravo (188,459 km²), la Cuenca del Grijalva-Usumacinta (100,000 km²) y la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago (190,366 km²). Por su longitud, destaca el Río Bravo con 3,034 km, actuando como frontera entre México y Estados Unidos. Otros ríos importantes son el Lerma, que recorre 750 km desde el centro del país hasta desembocar en el Océano Pacífico a través del Río Santiago, así como el Río Grijalva y el Usumacinta, claves en el sureste y conforman una de las zonas más ricas en recursos hídricos de México (CONAGUA, 2023).

En cuanto a los cuerpos de agua dulce, el Lago de Chapala es el lago natural más grande de México (1,100 km²), mientras otros lagos importantes son Pátzcuaro y Cuitzeo, ambos en Michoacán. También destacan lagunas costeras, como la Laguna de Términos en Campeche, de gran importancia ecológica. La gestión de los recursos hídricos en México es un desafío ya que el 60 % del agua se encuentra en el sureste y el 70 % de la población vive en el centro y norte, donde los recursos hídricos son escasos.

2.4 Uso de suelo y vegetación

En México, las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas e industriales dominan el 26 % de territorio (INEGI, 2017). La vegetación de zonas áridas y semiáridas ocupa el 29 % del país y es el ecosistema menos alterado, en zonas como el altiplano, y se compone de pastizales, cactáceas y matorrales semiáridos, donde la vegetación es escasa. El 20 % del territorio nacional está cubierto por bosque de pino y encino, principalmente en áreas montañosas, como la Sierra Madre y el Eje Neovolcánico (INEGI, 2017). Finalmente, el 25 % de la superficie consta de manglares, selvas húmedas y tropicales, como la selva Lacandona, las regiones costeras y el Golfo de México. Los principales desafíos para la conservación de estos ecosistemas son la deforestación y el cambio de uso de suelo para agricultura y urbanización.

2.5 Geología

La geología de México es diversa debido a procesos geológicos que han afectado la región durante millones de años, y el país abarca rocas que datan del Precámbrico al Cuaternario (Tarbuck et al., 2013). En México se encuentran secuencias de rocas sedimentarias marinas y continentales del Mesozoico, testimonio de la existencia de mares que cubrieron grandes partes del país. Durante el Cretácico, el país estaba sumergido en un mar que depositó calizas, lutitas y areniscas en áreas como la Sierra Madre Oriental y la península de Yucatán. Las formaciones volcánicas más jóvenes (Cenozoico), predominan en el Eje Neovolcánico, mientras que el noroeste está compuesto por basamentos rocosos más antiguos del Precámbrico (INEGI, 1999; Tarbuck et al., 2013; SGM, 2019; CONAGUA, 2024).

México está moldeado por la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos y el Pacífico, lo que genera estructuras geológicas complejas y una intensa actividad sísmica y volcánica. El país está atravesado por sistemas de fallas, como la Falla de San Andrés en Baja California, y grandes cadenas montañosas formadas por plegamientos y fallamientos, como las sierras Madre Occidental y Oriental. Estas estructuras son fundamentales en la formación del relieve del país, además de influir en los patrones de drenaje y en la formación de cuencas sedimentarias. La subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica también ha generado el Eje Neovolcánico, una zona activa de vulcanismo que incluye volcanes como el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl (Tarbuck et al., 2013). Respecto a la litología, las montañas del país están formadas por rocas volcánicas como basaltos, andesitas y riolitas, mientras que las regiones costeras y llanuras contienen rocas sedimentarias como areniscas y calizas. En la península de Yucatán, las formaciones carbonatadas son predominantes y están asociadas con sistemas de cuevas y cenotes. En el norte y noreste del país se encuentran extensiones de rocas sedimentarias, que registran los ciclos de avance y retroceso oceánicos (Tarbuck et al., 2013).

En términos de hidrogeología, las formaciones geológicas permiten el almacenamiento y el flujo de agua subterránea. Los acuíferos más importantes del país se encuentran en áreas de rocas sedimentarias, como las calizas kársticas de la península de Yucatán, donde se han formado extensos sistemas subterráneos de agua. Los acuíferos volcánicos, comunes en el Eje Neovolcánico y en las zonas de montaña, están compuestos por rocas fracturadas que permiten el almacenamiento y movimiento del agua subterránea. En términos de recarga total media anual, se estima en 78,594 hm³/año (Tarbuck et al., 2013; CONAGUA, 2023).

3. Materiales y métodos

3.1 Datos por clasificar

Se generaron cinco mapas de recarga media anual de agua subterránea en México a partir de archivos Shape de descarga gratuita obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para la Biodiversidad (en lo sucesivo, CONABIO). Los datos disponibles más recientes datan de 2008 y fueron descargados en 2025 de la URL <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.

Tabla 1 | Recarga media por región hidrológico-administrativa en México (CONABIO, 2008).

Table 1 | Average recharge by hydrological-administrative region in Mexico (CONABIO, 2008).

Región Hidrológico-Administrativa (RHA)	Recarga media (hm ³ /año)	Área (km ²)	Recarga específica (mm/año)
I. Península Baja California	1.233	146.804	8,4
IX. Golfo Norte	1.392	138.360	10,1
V. Pacífico Sur	1.696	91.547	18,5
XIII. Valle de México	1.835	15.206	120,7
VII. Cuencas Centrales del Norte	2.297	243.081	9,4
II. Alto Noroeste	2.870	197.235	14,6
III. Bajo Noroeste	3.194	155.646	20,5
X. Golfo Centro	3.849	113.748	33,8
IV. Pacífico Centro	4.220	174.743	24,1
VI. Frontera Norte	5.081	319.288	15,9
VIII. Lerma Santiago	7.566	132.718	57,0
XI. Golfo Sur	18.015	102.797	175,2
XII. Península de Yucatán	25.316	118.735	213,2

Para el análisis, se empleó un sistema de coordenadas proyectadas en unidades métricas con el datum horizontal y el elipsoide WGS84. Los valores de recarga de acuíferos (ordenados de menor a

mayor) y el área de cada región hidrológico-administrativa (RHA) se presentan en la Tabla 1. A partir de esos datos se calculó la recarga específica como cociente entre recarga media anual y área de cada RHA (mm/año), lo que permitió una comparación más justa entre regiones de distinto tamaño y facilitó la clasificación de datos en ArcMap. Finalmente, la simbología adaptó el modelo de color CMYK con una gradación azul.

Antes de analizar los métodos de clasificación de datos, se definieron conceptos elementales según la literatura (Slocum et al., 2023): a) **Intervalo**: conjunto de valores que toma una magnitud entre dos límites (al dividir de 1 a 100 en 4 clases, los intervalos serían de 25); b) **Clase**: conjunto de elementos con caracteres comunes (al dividir de 1 a 100 en cuatro clases, estas serían 0-25, 26-50, 51-75, 75-100); c) **Rango**: variación de un fenómeno entre el límite menor y mayor (volumen mayor de recarga 25,316, menos volumen menor de recarga 1,233, igual a rango de 24,083 hm³/año).

Una vez definidos estos conceptos, se seleccionó un número apropiado de clases para cada método de clasificación de datos. En este trabajo se usaron diferentes cantidades de clases dependiendo del método utilizado, y se consideró como límite cinco, teniendo en cuenta la dificultad que supondría distinguir entre la luminosidad del azul usando más clases. Otra consideración fue determinar el nivel de precisión de los datos que mostró cada método. Dicho nivel fue función de los datos iniciales disponibles, la calidad de dichos datos y la facilidad con la que se cree que los lectores pueden interpretar los valores numéricos proporcionados.

También se consideró qué tipo de mapa cuantitativo se utilizaría (puntos, coropletas, símbolos graduados, gráficos, flujo o isarítmico). A continuación, se definen estos conceptos:

1. **Mapa de puntos.** Utiliza puntos para mostrar datos geoespaciales, y cada punto representa un valor unitario. Es un mapeo de puntos de uno a muchos y el valor unitario es mayor que uno (Slocum et al., 2023).
2. **Mapa de coropletas.** Simboliza con sombreado datos basados en unidades administrativas. Los datos se agrupan en clases antes de la cartografía y se simbolizan utilizando un esquema de colores para datos cuantitativos; así, la apariencia se ve afectada por la clasificación de datos y se genera un mapa clasificado. Los cartógrafos crean varios mapas de coropletas a partir de los mismos datos y, eligen uno con una buena organización espacial de clases para la versión final (Slocum et al., 2023).
3. **Mapa de símbolos graduados.** Cubre mapas coropléticos y dasimétricos, porque ambos tipos utilizan un esquema de colores graduados para mostrar variación en datos espaciales. Utilizan símbolos como círculos o triángulos para representar diferentes clases de valores (Slocum et al., 2023).
4. **Mapa de gráficos.** Utiliza gráficos circulares (muestra dos conjuntos de datos cuantitativos) o de barras (comparan datos uno contra otro, y utilizan la altura de las barras verticales para representar datos cuantitativos) (Slocum et al., 2023).
5. **Mapa de flujo.** Muestra datos de interacción espacial, como tráfico y migración. Uno de los métodos para realizar mapas de flujo consiste en representar clases de valores variando el ancho de la línea (Slocum et al., 2023).
6. **Mapa isarítmico.** Utiliza isolíneas para representar una superficie, donde cada isolínea conecta puntos de igual valor. Estos mapas muestran el terreno y la superficie estadística creada mediante interpolación espacial (Slocum et al., 2023).

En este trabajo se utilizaron mapas de coropletas debido a la naturaleza de los datos (valores numéricos de recarga natural asociados a polígonos de regiones hidrológico-administrativas) y porque estos mapas son fáciles de interpretar debido al número limitado de colores, además de la facilidad con la que se pueden relacionar con los colores de leyenda apropiados. Pese a sus ventajas, los mapas de coropletas presentan algunos problemas, tales como:

1. **Elección de colores y patrones de sombreado.** Los colores y patrones de sombreado influyen en la lectura del mapa por el usuario. Es normal utilizar la convención "cuanto más oscuro, mayor" al especificar patrones. Sin embargo, surge confusión entre mapas en los que un valor alto es negativo (desempleo, contaminación) y aquellos en los que un valor alto es positivo (empleo, alfabetización) (Chang, 2022). En este trabajo, el azul más oscuro se asoció a mayores volúmenes de recarga y viceversa.
2. **Elección del sistema de clasificación.** Se debe especificar el número de clases utilizadas y los intervalos de clases asignados, ya que cuanto mayor es el número de clases, el mapa es más confuso (a mayor cantidad de clases, mayor complejidad del mapa). Hay métodos para especificar intervalos de clase que se basan en reglas aritméticas, o en hacer coincidir los patrones estadísticos de los datos que se presentan (Chang, 2022). En este trabajo, el límite máximo fue de cinco clases.
3. **Elección de la unidad espacial.** La fusión de datos conduce a una pérdida de información al enmascarar variaciones y patrones internos. Este problema (denominado MAUP en inglés) significa que los límites de las unidades espaciales ocultan patrones subyacentes en los datos. Si se agregan datos en unidades espaciales grandes, es normal hacerlo sobre la base de relaciones formales (ciudades que se anidan en estados o países). Como resultado cartógrafos sin escrúpulos pueden dibujar mapas de coropletas con patrones elegidos para representar datos mal, por lo que se debe estudiar críticamente el mapa antes de llegar a conclusiones sobre los datos presentados (Chang, 2022). En este trabajo, la unidad espacial fueron trece RHA definidas por CONAGUA.

3.2 Métodos de clasificación de datos

La clasificación de datos implica usar un método y una serie de clases para organizar datos del mapa (Li y Shan, 2022). Con cambios en el método de clasificación, número de clases, o intervalos, los mismos datos producen mapas diferentes y patrones espaciales diversos. Por ello se debe experimentar con la clasificación de datos antes de elegir un método de clasificación final; dicha elección debe guiarse por el propósito y los principios de comunicación del mapa (Heywood et al., 2010; Chang, 2022; Slocum et al., 2023). Para la clasificación de datos, ArcMap 10.5 ofrece seis métodos: intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales/Jenks, intervalos geométricos, media/desviación estándar. Dentro de estos métodos, hay criterios que pueden usarse para elegir o juzgar su utilidad: 1) Considerar la distribución de datos en una recta numérica, 2) Facilidad de comprensión del concepto, 3) Facilidad de cálculo, 4) Facilidad de comprensión de simbología, 5) Coincidencia de valores de simbología con rangos de datos en cada clase y 6) Apoyo para seleccionar el número de clases (Slocum et al., 2023).

Un problema con los métodos de clasificación es que dependen del entorno informático del que dispone el cartógrafo (que haya software disponible para aplicar los métodos de clasificación) y del

conocimiento del usuario (que el cartógrafo por lo menos tenga conocimientos de la zona de estudio, así como de cálculo y estadística).

a) Método de intervalos iguales

Este método divide los datos en un número de rangos de igual ancho especificado por el usuario, es decir, cada clase ocupa un intervalo igual a lo largo de la recta numérica (Slocum et al., 2023). Como desventaja, crea clases con distribución desigual de datos y/o clases que no contienen datos. Los pasos para el cálculo de un mapa de X rangos son: 1) Determinar el intervalo que ocupa cada clase en la recta numérica dividiendo el rango de datos por el número de clases (Ec. 1), 2) Determinar el límite superior de cada clase sumando el intervalo de clase al valor más bajo, 3) Determinar el límite inferior de cada clase de modo que este justo por encima del valor más alto en una clase de menor valor, 4) Especificar los límites de clase que se muestran en la leyenda (deben reflejar la precisión de los datos en los que se basa la clasificación) y 5) Determinar qué datos pertenecen a cada clase comparando los valores de los datos sin procesar con los límites de leyenda del paso 4.

$$\text{Intervalo} = \frac{\text{Mayor-menor}}{\text{Número de clases}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Una ventaja del método es que los cinco pasos se pueden completar con calculadora o lápiz y papel, además de que el método facilita la comprensión de la simbología ya que no hay espacios en la leyenda y los intervalos son fáciles de entender (e.g., 1,233–6,049, 6,049–10,866). Las lagunas se evitan creando leyendas continuas. Sin embargo, este enfoque no indica el rango real de valores que pertenecen a una clase. Otra ventaja es que los límites de la leyenda no contienen espacios vacíos: para este trabajo, la diferencia entre el valor superior de recarga en una clase y el valor inferior en la siguiente clase fue 0. Otra ventaja es que los límites de la leyenda se simplifican de modo que solo se muestran los valores más altos y bajos de los datos y el límite superior de cada clase, lo que permite una interpretación más rápida del mapa, pero también crea confusión respecto de los límites de cada clase (por ejemplo, el lector podría preguntarse si en la Fig. 1, 6,049 hm³/año cae en la primera o segunda clase). Como desventaja, las lagunas que ocurren en este método de clasificación (como ocurre con la clase 3 de la Fig. 1, cuyos valores van de 10,866 a 15,682 hm³/año), podrían hacer que el lector se pregunte por qué hay datos en la simbología que no aparecen en el mapa.

La principal desventaja del método es que los límites de clase no consideran cómo se distribuyen los datos a lo largo de la recta numérica. Por ejemplo, al inspeccionar la dispersión de datos de recarga, se observa que la clase 5 de la Fig. 1, parece estar desperdiciada, ya que esta clase solo tiene datos de 20,499 a 25,316 hm³/año. Sin embargo, en el lado positivo, se debe tener en cuenta que los valores de datos inusuales (como los valores atípicos de 10,866 a 15,682 hm³/año) aparecieron en su propia clase única. Por lo tanto, aunque no se utilizan varias clases para los datos superiores de recarga, la distribución cartografiada en la Fig. 1 muestra que la Península de Yucatán es diferente del resto de los datos.

b) Método de frecuencias iguales/cuantiles

El método de frecuencia igual o cuantiles divide la cantidad total de datos por la cantidad de clases y garantiza que cada intervalo contenga la misma cantidad de valores de datos. Así, los datos se ordenan por rango y se colocan el mismo número de valores en cada clase (Ec. 2). Este método tiene diferentes nombres según el número de clases: los mapas de cuantiles de cuatro, cinco y seis clases se denominan cuartiles, quintiles y sextiles, respectivamente (Slocum et al., 2023).

$$\text{Numero de datos por clase} = \frac{\text{Total de datos}}{\text{Número de clases}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Para definir los límites de leyenda para el método de frecuencia igual son posibles dos enfoques. Uno es especificar los valores más altos y bajos de los miembros de una clase, mientras que el otro enfoque es evitar estas brechas calculando un límite de clase como un promedio del valor más alto de una clase y el valor más bajo de la siguiente clase. En este trabajo, se utilizó el primer enfoque porque refleja con mayor precisión el rango de valores de datos que pertenecen a una clase.

Como ocurre con los intervalos iguales, una ventaja de los cuantiles es que los límites de clase se pueden calcular manualmente; además, debido a que en cada clase hay un número igual de datos, el porcentaje de datos en cada clase también será el mismo. Dependiendo del número de clases, esto podría simplificar la discusión de los datos mapeados. Por ejemplo, en el mapa de recarga natural de quintiles, cada clase muestra el 20 % de los datos. Una ventaja es que la mediana (una medida de tendencia central en los datos) se asociará con las clases. Para un número impar de clases, la mediana está en el centro de la clase media, mientras que para un número par de clases, la mediana está entre las dos clases medias (o cerca de este punto; en el caso de los datos de recarga, la mediana tiene un valor de 3,194 hm³/año y se encuentra dentro de la tercera clase). La tercera ventaja de los cuantiles es que, debido a que la asignación de clases se basa en el orden de clasificación, los cuantiles son útiles para datos de nivel ordinal. Una cuarta ventaja es que, si las unidades de enumeración son del mismo tamaño, cada clase tendrá la misma área de mapa (Slocum et al., 2023).

El método de los cuantiles comparte la principal desventaja de los intervalos iguales: no considera cómo se distribuyen los datos a lo largo de la recta numérica. Por ejemplo, para los datos de recarga de acuíferos, los valores del centro y sureste del país (de 7,566 a 25,310 hm³/año, respectivamente) se incluyen en la clase 5, la cual tiene valores de magnitud muy distintos (Fig. 1). Por lo tanto, se eliminó el problema de las clases vacías, pero se colocaron valores de datos muy diferentes en la misma clase.

c) Método de clasificación manual

Este método permite al usuario elegir los intervalos apropiados o significativos. Por ejemplo, al cartografiar las tasas de cambio de la precipitación municipal, el usuario puede elegir cero o el promedio nacional como ruptura de clase (Chang, 2022). En este método no existe una fórmula matemática predefinida, sino que los intervalos son elegidos por el usuario con base en criterios o conocimiento específico de los datos, donde la única restricción es que cada intervalo I_i debe ser un subconjunto de $[X_{\min}, X_{\max}]$ que no se solape con otros intervalos. Para el plano de clasificación

manual de recarga natural de México, se generaron dos clases, dividiendo al país en una zona de recarga baja relativa al centro y norte del país (clase 1, de 0 a 8,000 hm³/año) y una zona de recarga alta relativa al sureste del país (clase 2, de 8,000 a 26,000 hm³/año) (Fig. 1). Como desventaja se crearon valores límite que no corresponden a los datos medidos de recarga natural (0 y 26,000 hm³/año). De la aplicación de este método se desprende que puede ser sumamente subjetivo y está sujeto a la comprensión que tenga el cartógrafo del área de estudio, así como de los valores que se estén mapeando.

d) Método de intervalos naturales/Jenks

El método de intervalos naturales/Jenks optimiza la agrupación de valores de datos al utilizar un algoritmo informático para minimizar diferencias entre valores de datos de la misma clase y maximizar diferencias entre intervalos (Chang, 2022). El algoritmo divide los datos en clases según los intervalos naturales representados en el histograma de datos. Proporciona un método de sentido común cuando se producen intervalos naturales, pero a menudo los datos están muy dispersos para proporcionar intervalos claros. Divide los datos usando media, cuartiles superiores e inferiores, valores atípicos y extremos y describe la distribución de los datos. En la clasificación de intervalos naturales, los gráficos de dispersión o histogramas se examinan para determinar clases lógicas en los datos. El propósito de los intervalos naturales es minimizar las diferencias entre valores de datos en la misma clase y maximizar las diferencias entre clases. Para ilustrar el cálculo de los intervalos naturales, se dividieron los datos de recarga de acuíferos en cinco clases (Fig. 1). Los valores cercanos a 2,000 (1,233, 1,392, 1,696, 1,835) se agruparon para crear una primera clase. A continuación, los valores cercanos a 2,000 y 3,000 (1,835, 2,297, 2,870, 3,194) se agruparon en una segunda clase. La tercera clase fueron valores cercanos a 3,000 y 5,000 (3,194, 3,849, 4,220, 5,081), y la cuarta clase, valores cercanos a 5,000 y 8,000 (5,081, 7,566). Los valores más altos (18,015, 25,316) fueron muy diferentes del resto de los datos, por lo que se ubicaron en una quinta clase. Un problema obvio con los intervalos naturales es que las decisiones sobre los límites de clase son subjetivas y varían entre cartógrafos. Otro factor a considerar es que un mapa con más clases es más difícil de interpretar, ya que será necesario diferenciar una mayor cantidad de símbolos de área. El algoritmo de Jenks ajusta las clases de manera iterativa hasta que la suma de las varianzas intraclase se minimiza (Slocum et al., 2023).

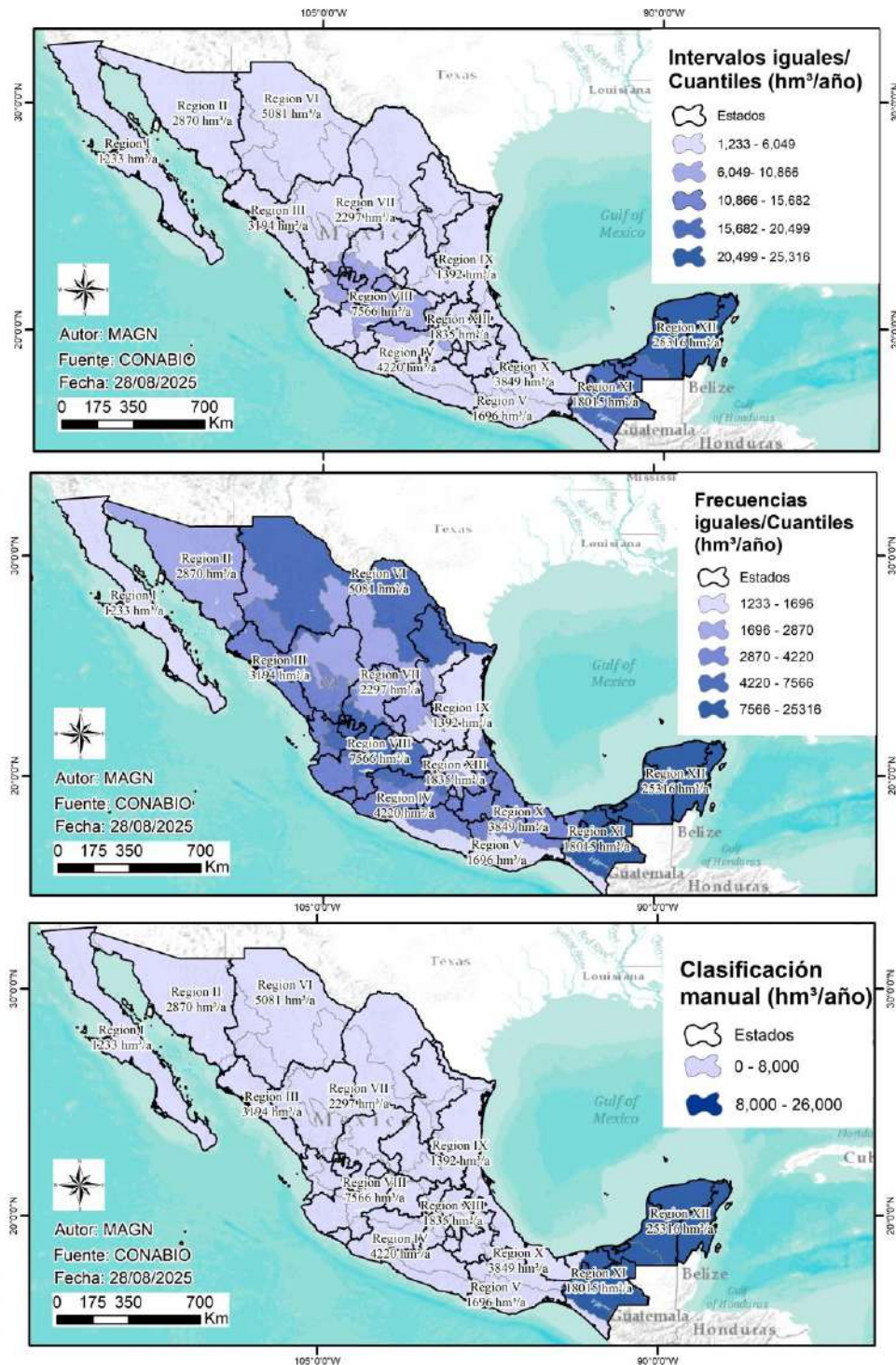
e) Método de intervalos geométricos

Este método divide los datos en clases utilizando una progresión geométrica (los intervalos crecen proporcionalmente en lugar de ser equidistantes). Los límites de las clases y la razón geométrica se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Razón geométrica} = \left(\frac{\text{Valor máximo de la serie}}{\text{Valor mínimo de la serie}} \right)^{\frac{1}{\text{Número de clases}}} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\text{Límite superior} = (\text{Límite inferior}) * (\text{Razón geométrica}) \quad \text{Ec. (4)}$$

En este método se eligió utilizar tres clases, por lo que se obtuvo la razón geométrica para los datos de recarga fue de 2.74 (Ec. 3); así mismo, el límite superior de la primera clase fue $1,233 \times 2.74 \approx 2,454$; el límite superior de la segunda fue $2,454 \times 2.74 \approx 7,164$, y el límite superior de la tercera fue $7,164 \times 2.74 \approx 25,316$ (Ec. 4). De estos resultados se obtiene que este método utiliza una razón de crecimiento constante entre los límites de clases, lo que genera intervalos crecientes a medida que aumenta el valor de los datos. Esto permite una mejor representación de datos altamente sesgados o con una amplia dispersión, como es el caso de estos datos de recarga natural de acuíferos.



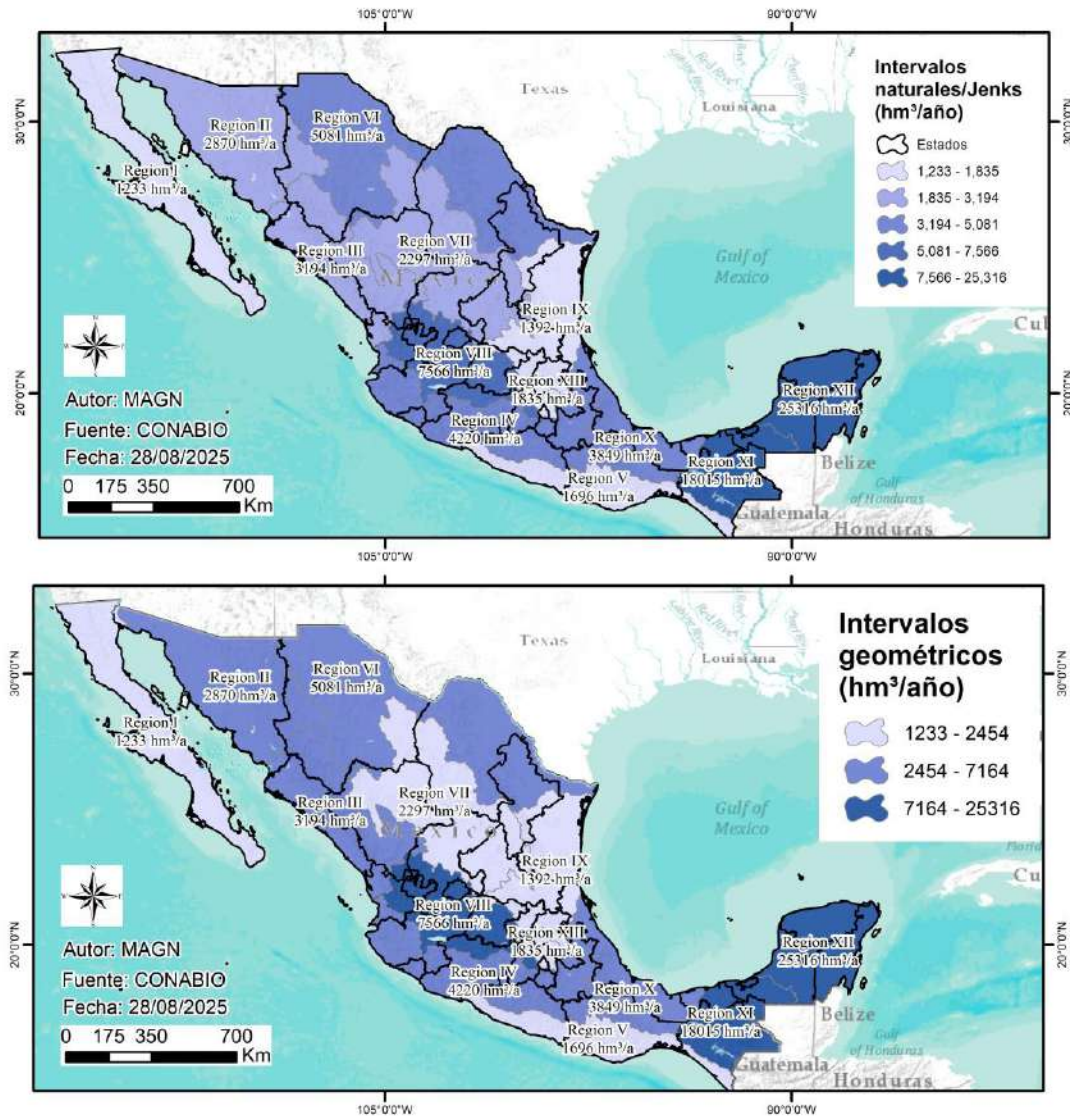


Figura 1 | Métodos de clasificación de datos aplicados a la recarga en México.

Figure 1 | Data classification methods applied to recharging in Mexico.

3. Resultados y discusión

La Fig. 1 se basa en los mismos datos (recarga de agua subterránea en $\text{hm}^3/\text{año}$) y las mismas unidades espaciales (regiones hidrológico-administrativas en km^2), pero generaron configuraciones divergentes en la distribución de los datos, lo que resalta la importancia de seleccionar el enfoque más adecuado según el objetivo del análisis (Tabla 2).

Tabla 2 | Resultados obtenidos para cada método de clasificación de datos.**Table 2** | Results obtained for each data classification method.

Método	Clases	Intervalos	Rango
Intervalos iguales	5 clases: 1.233 a 6.049, 6.049 a 10.866, 10.866 a 15.682, 15.682 a 20.499 y 20.499 a 25.316	1 intervalo homogéneo (4.816)	24.083
Frecuencias iguales/cuantiles	5 clases: 1.233 a 1.696, 1.696 a 2.870, 2.870 a 4.220, 4.220 a 7.566, 7.566 a 25.316	4 intervalos heterogéneos (463, 1.035, 1.026, 20.235)	24.083
Clasificación manual	2 clases: 0 a 8.000 y 8.000 a 26.000	2 intervalos heterogéneos (8.000 y 18.000)	26.000
Intervalos naturales/Jenks	5 clases: 1.233 a 1.835, 1.835 a 3.194, 3.194 a 5.081, 5.081 a 7.566 y 7.566 a 25.316	5 intervalos heterogéneos (602, 1.359, 1.887, 2.485, 17.750)	24.083
Intervalos geométricos	3 clases: 1.233 a 2.454, 2.454 a 7.164 y 7.164 a 25.316	3 intervalos heterogéneos (1221, 4710, 18152)	24.083

Los mapas generados mostraron que los métodos basados en conjuntos iguales de datos (Intervalos y Frecuencias iguales/Cuantiles) generaron clases más equilibradas en términos de número de observaciones, mientras que los métodos basados en distribución de datos (Clasificación manual, Intervalos naturales/Jenks, e Intervalos geométricos) identificaron con mayor precisión patrones espaciales de recarga. De los datos analizados, los valores más bajos de recarga fueron 1,233 hm³/año en la península de Baja California, con un área de 146,804 km² (7.47 % de la superficie del país), mientras que los valores más altos fueron 25,310 hm³/año en la península de Yucatán, con un área de 118,735 km² (6.04 % de la superficie del país).

Una limitación de la mayoría de los métodos de clasificación es que no consideran la distribución espacial de los datos, aunque existen técnicas que resuelven este problema, como minimizar la diferencia entre clases para unidades de enumeración contiguas (minimizar el error de límite), maximizar la autocorrelación espacial general en el mapa clasificado e igualar el área en cada clase (Snyman et al., 2024). En este trabajo, los métodos solo consideraron los valores de recarga a lo largo de la recta numérica y se trató de simplificar e interpretar los mapas de coropletas considerando la distribución espacial de los datos durante la clasificación de datos. Otra limitante fue que la información corresponde a un estudio de 2008 (CONABIO, 2008), por lo que los datos no se

encuentran actualizados si se comparan con otras publicaciones como Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2023), ya que hay 15 años entre publicaciones (Tabla 3). Así, existe una diferencia relativa a valores de recarga, temporalidad de datos y nombres de las RHA en ambos trabajos. Todo esto dificulta realizar una comparación precisa entre los datos de ambos estudios.

Tabla 3 | Recarga media en las regiones hidrológico-administrativas de México (CONAGUA, 2023).

Table 3 | Average recharge in the hydrological-administrative regions of Mexico (CONAGUA, 2023).

Región	Recarga media (hm³/año)	Precipitación pluvial (mm/año)
Hidrológico-Administrativa		
1. Península Baja California	1.648	159.4
2. Pacífico Sur	1.936	1.205,2
3. Aguas del Valle de México	2.289	659
4. Cuencas Centrales del Norte	2.462	388
5. Pacífico Norte	3.061	759.1
6. Noroeste	3.307	425.8
7. Golfo Norte	4.099	851
8. Golfo Centro	4.599	1.820
9. Balsas	4.871	926,2
10. Río Bravo	6.370	384,2
11. Lerma Santiago-Pacífico	9.831	810,3
12. Frontera Sur	22.718	2.001,3
13. Península de Yucatán	25.316	1.250,6

Los datos descritos en este trabajo podrán ser criticados porque son un conjunto antiguo (del 2008) y pequeño (13 polígonos con valores de recarga), y a que solo se ha considerado una posible manipulación de dicho conjunto de datos (el tipo de método de clasificación). Sin embargo, dichos datos se pueden descargar de manera oficial, por lo que se debe reflexionar respecto a si vale la pena mantener estos datos accesibles o si se deben reemplazar por estudios más recientes como el elaborado por CONAGUA en 2023 (ver Tabla 3). Por otro lado, para ampliar esta noción a conjuntos de datos más grandes y considerar múltiples criterios para modificar la clasificación, existen

enfoques de clasificación de datos que consideren criterios para clasificar un conjunto de datos: 1) minimizar la varianza del error en cada clase, 2) minimizar la diferencia entre clases para unidades de enumeración contiguas, 3) maximizar la autocorrelación espacial general en el mapa clasificado resultante, y 4) igualar el área en cada clase (Li y Shan, 2022). Las tres últimas son restricciones espaciales.

4. Conclusiones

Los métodos de clasificación de datos integran y analizan grandes volúmenes de datos espaciales, lo que los convierte en una herramienta valiosa para la cartografía y la hidrogeología. En este estudio se aplicaron cinco métodos en ArcGIS 10.5 para identificar la distribución de las zonas de recarga natural de agua subterránea en México. Los métodos utilizados fueron intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales, e intervalos geométricos y los hallazgos mostraron que la selección del método de clasificación influye en la interpretación de la recarga de agua subterránea.

El método de intervalos iguales (clases iguales de la recta numérica) es apropiado cuando los intervalos producen valores redondeados fáciles de interpretar. El método de frecuencias iguales/cuantiles (mismo número de valores en cada clase) es deseable porque puede referirse fácilmente a un porcentaje fijo de valores en cada clase, y es el único método que se puede utilizar para datos ordinales. Una limitación de los intervalos y cuantiles iguales es que no consideran la distribución de los datos a lo largo de la recta numérica, mientras que el método de desviación estándar media y el óptimo son dos métodos de clasificación que sí lo hacen. El método de clasificación manual (cada clase definida por el usuario) es útil si se tiene un conocimiento previo de los datos y se desea enfocar en una diferencia específica (se mostró el alto nivel de recarga natural de la Península de Yucatán en comparación con el resto del país). Como desventaja, se perdió detalle del resto de valores de recarga del país, ya que las clases fueron muy generales. El método de intervalos naturales (basado en la distribución natural de los datos) se ajustó mejor a la distribución de los datos y agrupó los valores de manera más representativa; como desventaja, no todas las clases mostraron el mismo número de datos. El método de intervalos geométricos (basado en una progresión geométrica) permitió realizar una segmentación equilibrada de los datos al minimizar la distorsión; como desventaja, se redujo la precisión en la identificación de patrones específicos de recarga.

Cabe señalar que, a pesar de los avances significativos en los SIG en las últimas décadas, la hidrogeología sigue siendo una ciencia interpretativa y no exacta. En este contexto, mientras mayor sea la superficie estimada de recarga, mayor será también la incertidumbre asociada a los datos generados. No obstante, resulta valioso analizar los valores obtenidos de recarga específica y precipitación. Se identificaron tres RHA con valores elevados tanto de recarga como de precipitación: XII. Frontera Sur, XIII. Península de Yucatán y VIII. Golfo Centro. Asimismo, se observaron tres RHA con valores bajos de recarga: I. Península de Baja California, IV. Cuencas Centrales del Norte y X. Río Bravo y dos casos con discrepancias notables entre recarga y precipitación: Lerma Santiago-Pacífico y Río Bravo.

Los valores mínimos a nivel nacional se registraron en la RHA I “Península de Baja California”, con una recarga de 8.4 mm/año, derivada de una precipitación media anual de 159.4 mm/año, lo que

representa el 5.2 % del total. En contraste, los valores máximos se presentaron en la RHA XIII “Península de Yucatán”, con una recarga de 213.2 mm/año a partir de 1,250.6 mm/año de precipitación (17 %). Destacan también regiones donde no existe una correlación aparente entre precipitación y recarga, como la RHA X “Río Bravo”, donde se registra una recarga de 15.9 mm/año, a partir de 384 mm/año de precipitación, equivalente al 4.5 %. Estos porcentajes coinciden con lo reportado en la literatura, que señala una amplia variabilidad en la recarga de acuíferos, la cual puede oscilar entre el 0 % y el 50 % de la precipitación total, dependiendo de factores como el clima, la pendiente, la geología y el régimen de lluvias, entre otros (Bouwer, 2002; Hogan et al., 2004; Healy y Scanlon, 2010; Cai y Offerdinger, 2016; Andualet et al., 2021).

A través de la integración de variables como simbología, clases, intervalos y rangos, se buscó mejorar la comprensión de los métodos de clasificación de datos y proporcionar información relevante para la toma de decisiones relativa a la recarga de acuíferos y la gestión hídrica, la cual es un desafío global de creciente importancia. Como conclusión, no existe un único método de clasificación ideal, sino que se debe considerar el propósito del mapa y el conocimiento del público objetivo antes de seleccionar un método de clasificación. Se concluye que, en lugar de utilizar solo un método de clasificación, se utilicen varios métodos y así, el conjunto de mapas resultante será mucho más útil que un enfoque utilizando un solo método.

Para usuarios de SIG que tienen un enfoque hacia la gestión hídrica, es recomendable seleccionar los métodos de clasificación de datos considerando la naturaleza de la información, el objetivo de análisis y el público al que se dirigen. Ningún método es superior, por lo que se aconseja aplicar y comparar diferentes enfoques para obtener una visión completa de la recarga hídrica. Además, se deben validar los resultados con conocimiento hidrogeológico de los acuíferos locales, ya que la hidrogeología es una ciencia interpretativa con cierto grado de incertidumbre. Por último, generar varios mapas a partir de distintos métodos de clasificación de datos enriquece la toma de decisiones en la gestión hídrica, aportando insumos más robustos para enfrentar la variabilidad espacial y temporal que caracteriza la recarga de acuíferos en México.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización, M.A.G.N. y A.V.A.; metodología, M.A.G.N. y A.V.A.; software, A.E.F.E.; validación, N.N.F.; análisis formal, A.E.F.E.; investigación, M.A.G.N. y A.V.A.; recursos, M.A.G.N. y A.V.A.; conservación de datos, M.A.G.N. y A.V.A.; redacción-redacción del borrador original, M.A.G.N.; redacción-revisión y edición, A.V.A., A.E.F.E. y N.N.F.; visualización, A.E.F.E. y N.N.F.; supervisión, M.A.G.N.; administración del proyecto, M.A.G.N.; obtención de financiación, M.A.G.N. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Los autores agradecen las valiosas contribuciones de los revisores anónimos para la mejora de esta investigación, y también agradecen a la Facultad de Ingeniería de la UACH el apoyo proporcionado para la realización de este trabajo.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran influir en el trabajo presentado en este artículo.

5. Referencias

- Andualet, T. G., Demeke, G. G., Ahmed, I., Dar, M. A., & Yibeltal, M. (2021). Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100917. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917>
- Asaka, J. O., Argomedo, D. W., & Jones, N. P. (2024). Climate change risks to water security: Exploring the interplay between climate change, water theft, and water (in)security. *Water Policy*, 26(4), 359–380. <https://doi.org/10.2166/wp.2024.213>
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10, 121–142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
- Cai, Z., & Ofterdinger, U. (2016). Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology*, 535, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.066>
- Carrera-Hernández, J. J., & Gaskin, S. J. (2007). The Basin of Mexico aquifer system: Regional groundwater level dynamics and database development. *Hydrogeology Journal*, 15, 1577–1590. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0194-9>
- Chang, K.-T. (2022). Introduction to geographic information systems (10 Ed). 418 pp. McGraw Hill.
- CONABIO. (2008). Recarga media total de acuíferos Escala: 1:1,000,000.
- CONAGUA. (2023). Estadísticas del Agua en México (1 Ed). 312 pp. SEMARNAT. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html
- CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901), Ciudad de México. 33 pp. Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/cmdx/DR_0901.pdf
- Flores-Garnica, J. G., & Flores-Rodríguez, A. G. (2020). Comparative analysis of the number and intervals of forest fire risk classes. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 4-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>
- Healy, R. W., & Scanlon, B. R. (2010). Estimating groundwater recharge (1st. ED). 245 pp. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2010). An introduction to Geographical Information Systems (3 Ed). 464 pp. Pearson Education.
- Hogan, J. F., Phillips, F. M., & Scanlon, B. R. (2004). Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States. In *Water Science and Application* 9 (1st ed.). 172 pp. American Geophysical Union. <http://dx.doi.org/10.1029/WS009>

- INEGI. (1999). Estudio hidrológico del estado de Chihuahua (INEGI, Ed.; Primera Ed). 244 pp. Colección: Estudio hidrológico del estado de. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825221768>
- INEGI. (2017). Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie VII. Colección: Guía para la interpretación de cartografía. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463902836>
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. G. (2018). *The atmosphere: an introduction to meteorology* (13 Ed). 712 pp. Pearson College Div.
- Li, S., & Shan, J. (2022). Adaptive Geometric Interval Classifier. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(8), 430. <https://doi.org/10.3390/ijgi11080430>
- Mohan, S., & Pramada, S. K. (2023). Natural groundwater recharge estimation using multiple methods combined with an experimental study. *Water Supply*, 23(5), 1972–1986. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.090>
- Moukoko, G. B. M., Mvoundou, C. N., Mangouende, J., Lendzea, R., & Tathy, C. (2023). Study of the Impact of Climate Change on Water Resources in the Sangha Watershed at Ouessou Hydrological Station, Republic of the Congo-Brazzaville (1961-2020). *Journal of Water Resource and Protection*, 15(11), 611–630. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2023.1511034>
- Paramasivam, C. R. (2019). Chapter 2 - Merits and demerits of GIS and geostatistical techniques. In: Venkatramanan, S., Prasanna, M. V., & Chung, S. Y. (Eds.). *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (pp. 17–21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00002-X>
- Roger, F., Benjamin, N. N., Ghislain, T. Y. J., & Emmanuel, E. G. (2011). Relationship between Climate and Groundwater Recharge in the Besseke Watershed (Douala – Cameroon). *Journal of Water Resource and Protection*, 03(08), 607–619. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.38070>
- Sanz, E., Menéndez, I., Menéndez Pidal de Navascués, I., & Távara, C. (2011). Calculating the average natural recharge in large areas as a factor of their lithology and precipitation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 8, 4753–4788. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-4753-2011>
- Saraf, P., & Regulwar, D. G. (2024). Integrated Hydrological Modeling of the Godavari River Basin in Maharashtra Using the SWAT Model: Streamflow Simulation and Analysis. *Journal of Water Resource and Protection*, 16(1), 17–26. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2024.161002>
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Faunt, C. C., Pool, D., & Uhlman, K. (2016). Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona. *Environmental Research Letters*, 11(3), 035013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035013>
- SGM. (2019). Carta Geológico Minera 'República Mexicana'. <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>
- Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2023). Thematic Cartography and Geovisualization. In: *Thematic Cartography and Geovisualization* (4 Ed). 612 pp. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003150527>
- Snyman, L., Coetzee, S., & Rautenbach, V. (2024). Assessing the Suitability of Data Classification Methods for Choropleth Maps Depicting Population Distribution in South Africa. *Abstracts of the ICA*, 7, 160. <https://doi.org/10.5194/ica-abs-7-160-2024>

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2013). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física (10 Ed.). Pearson Education

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Water Governance Under Pressure: Institutional Performance and Resource Management in Mexico

Gobernanza del agua bajo presión: desempeño institucional y gestión de recursos en México

David Humberto Sánchez Navarro¹* y Carmen Julia Navarro-Gómez¹

¹ Universidad Autónoma de Chihuahua. Circuito Universitario 31109, Campus Universitario II, C.P. 31125 Chihuahua, Chih. México.

*Correspondencia: Correo electrónico: dhsanchez@uach.mx (David H. Sánchez N.)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.2021>

Recibido: 31 de julio de 2025; Aceptado: 30 de septiembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Dra. Mélida Gutiérrez

Abstract

Mexico's water resources face challenges due to historical origins, socio-economic evolution, and environmental changes. Despite efforts, the water problem has worsened, leading to shortages, declining availability, and increasing demand. Factors contributing to these issues include limited budgets, lack of coordination, and planning-implementation gaps. This study analyzes the role of water institutions in Mexico and their impact on water management. The research aims to bridge knowledge gaps, provide insights into effective water management, and address the pressing water challenges, fostering a resilient water sector. The study's findings can guide decision-making, support the development of sustainable strategies, and enhance water resource management.

Keywords: governance, water management, water crisis

Resumen

Los recursos hídricos de México enfrentan desafíos debido a sus orígenes históricos, la evolución socioeconómica y los cambios ambientales. A pesar de los esfuerzos, el problema del agua se ha agravado, provocando escasez, disminución de la disponibilidad y aumento de la demanda. Entre los factores que contribuyen a estos problemas se incluyen los presupuestos limitados, la falta de coordinación y las deficiencias en la planificación e implementación. Este estudio analiza el papel de las instituciones del agua en México y su impacto en la gestión del agua. La investigación busca reducir las brechas de conocimiento, brindar perspectivas para una gestión hídrica eficaz y abordar los desafíos acuciantes en materia de agua, promoviendo un sector hídrico resiliente. Los hallazgos

del estudio pueden orientar la toma de decisiones, respaldar el desarrollo de estrategias sostenibles y mejorar la gestión de los recursos hídricos.

Palabras clave: gobernanza, gestión del agua, crisis del agua

1. Introduction

Water management represents a foundational pillar for achieving sustainable development and safeguarding public health. Ensuring the reliability and continuity of water supply systems is indispensable for the stability and functionality of modern urban and rural communities. However, accelerated urban expansion and the intensification of climate change impacts have substantially increased the complexity of water resource management. Challenges such as freshwater scarcity, aquifer depletion, and deterioration of water quality are no longer hypothetical scenarios but urgent global realities requiring coordinated, evidence-based responses. Moreover, rising population densities and the accelerated pace of urban sprawl have transformed cities into hotspots of vulnerability, amplifying the difficulty of delivering essential urban services and exacerbating pressure on existing water infrastructure (Martínez et al., 2015).

Several developing countries are putting their resources to intensive use, leading to overexploitation, contamination of their water resources, and the need to develop long-distance water imports. These countries have diminishing reliability of access to water, particularly for poor and isolated populations (Sánchez-Cohen et al., 2018). This is the case of Mexico, which has become a water-stressed country, especially in the arid and northern part of the country and in the principal megacities. Despite a long history of institutional reforms, Mexico is still unable to ensure adequate urban water services for its population, and its aquifers and ecosystems continue to deteriorate (Barkin, 2012). In terms of water resources, there is an enormous imbalance between water availability and its use. The main economic activities are concentrated in the central, northern, and northwestern regions of the country, representing approximately 83 % of the GDP and 77 % of the population, but with a per capita water availability of only 2,044 m³/year (33 % of the country's water resources). On the other hand, in the south and eastern parts of the country, where water availability is 14,291 m³/year per capita, only 17 % of the GDP is produced (Tortajada, 2006; CONAGUA, 2019). Beyond domestic use, agriculture and industry are central drivers of water stress in Mexico. Agriculture, often reliant on non-technological irrigation practices, accounts for the majority of national water withdrawals and contributes to aquifer overexploitation (Velasco-Muñoz et al., 2018). Industry also exerts significant pressure, both through intensive extraction (Water footprint network, 2024). These dynamics exacerbate the imbalance between water availability and demand, underscoring that water scarcity is not solely an urban or domestic challenge (Amoah et al., 2021), but a systemic issue linked to economic production and environmental sustainability.

In this context, water management in Mexico becomes problematic due to the inverse relationship resulting from three factors: the distribution of water resources, the contribution to the national production of each region, and the demographic concentration (Nava, 2006), fabricating significant challenges to provide water services for its population (Arriaga-Medina & Piedra-Miranda, 2021). The technical, institutional, and economic-financial problems presented by virtually all drinking water suppliers in the country are translated into insufficient, irregular, and low-quality supply (González-Villarreal & Arriaga-Medina, 2014).

Mexico has achieved certain important goals in terms of the supply and coverage of potable water; nonetheless, there are still profound variances between the different agencies in efficiency and effectiveness. Water institutions need to accommodate physical, economic, institutional, and political constraints for a durable and holistic approach to improve the role of the Water Utilities (WU) (Saleth, 2014). Therefore, it is critical to analyze and understand the role of water institutions and their impact on the water sector performance in Mexico (Chopra & Ramachandran, 2021). However, there is limited information in the literature on drinking water management description in Mexico (Silva et al., 2018). Given the existing limitations and gaps in the literature regarding institutional frameworks in the water sector in Mexico, this study aims to analyze the role of water institutions and their influence on several dimensions of water sector performance in Mexico. This manuscript analyzes the current state of water resources management in the country, highlighting the principal institutional, regulatory, and operational challenges facing the sector. This study seeks to enhance understanding of institutional dynamics and promote informed decision-making. Ultimately, it aims to support the development and consolidation of effective water governance mechanisms that enable the sustainable and equitable management of water resources.

2. The Water Sector in Mexico: A Multidimensional Perspective

2.1 Characteristics of Mexico

Mexico ranks among the fifteen most populous countries globally and holds a similar position in terms of GDP. With a land area of approximately 1,964 million km², it is the fourteenth largest country by surface area (World Bank Group, 2023). The country's geographic diversity, shaped by its wide latitudinal extent, complex topography, and climatic variability, directly influences the distribution and availability of its water resources. The southern portion of the territory lies within the intertropical zone, while the north falls within the temperate zone, placing much of the country along latitudes comparable to those of the Sahara and Arabian deserts. These geographic and climatic conditions result in pronounced hydrological heterogeneity. Approximately two-thirds of the territory is classified as arid or semi-arid, receiving less than 500 mm of precipitation annually. In contrast, the southeastern region is characterized by a humid climate, with annual rainfall exceeding 2,000 mm. The national mean annual precipitation is approximately 760 mm, which is significantly lower than the global average of 1,127 mm (CONAGUA, 2024). Precipitation is highly seasonal, with most rainfall occurring during the summer months, typically as intense convective storms (García, 2004; Aguilar-Barajas et al., 2016). This uneven spatial and temporal distribution of water presents substantial challenges for water management, particularly in northern and central regions where surface water is scarce and groundwater is often overexploited.

As of December 2020, Mexico is administratively divided into 32 states comprising a total of 2,453 municipalities and 16 mayorships. These political divisions further influence water governance structures and resource allocation at the regional and local levels. There are 92 metropolitan areas, which estimate 82.5 million inhabitants, constituting 65.5 % of the projected population for 2023 (CONAGUA, 2024). The process of concentration of inhabitants in urban and semi-urban has accelerated strong stress on the environment given the increased demand for services (Tortajada, 2006). In Mexico, almost one-third of households in rural communities with populations below 2,500 lack potable water, and more than 63 % do not have basic, water-related services (CONAGUA, 2024).

Furthermore, most rural communities in Mexico exist under very dry or dry conditions, with an accentuated social lag that also inhibits economic development (Sánchez-Cohen et al., 2018). As stated by Cervantes-Jiménez et al. (2020), in Mexico, the extreme conditions of socio-economic inequality are undoubtedly reflected; these heavily marginalized areas have low economic productivity, high unemployment and outmigration rates, and poor access to services like clean water and sanitation (Tortajada, 2006).

2.2 Availability, variability, and water demand

Water resource availability in Mexico exhibits significant spatial and temporal variability, shaped by climatic heterogeneity, physiographic complexity, and uneven demographic and economic development. These conditions present considerable challenges for the effective regulation, allocation, and sustainable management of water resources at both national and regional levels. In regions where surface water is irregular and cannot be relied upon as a continuous source, aquifers become the primary supply, as is the case in much of northern Mexico. During drought periods, demand typically intensifies as users compensate for reduced surface availability, often leading to aquifer overexploitation. This situation highlights the need for adaptive management strategies that are able to reconcile fluctuating natural availability with the relatively constant demands of urban, agricultural, and industrial sectors.

The National Water Commission (CONAGUA), Mexico's principal authority for water governance, carries out its administrative, regulatory, technical, and advisory functions through 13 Basin Organizations (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010). These entities are aligned with the Hydrological Administrative Regions, which consist of grouped river basins that serve as operational units for integrated water management. To facilitate the integration of hydrological and socioeconomic information, the boundaries of the RHAs were delineated in accordance with municipal divisions.

Mexico contains approximately 1,471 river basins and 653 officially recognized aquifers, distributed across 13 administrative regions and 37 hydrological subregions (CONAGUA, 2022). However, the availability of renewable water is not aligned with the distribution of population or economic activity. While the southern and southeastern parts of the country receive most of the surface water due to higher rainfall, the central and northern regions, where more than half of the population resides, frequently experience water scarcity and mounting pressure on supply systems.

Groundwater serves as a vital source of supply, particularly in arid and semiarid zones where surface water is either limited or seasonally variable. As of January 2018, only 408 of the 653 aquifers had a positive water balance, reflecting a 37 % decline in groundwater availability due to long-term overextraction and reduced natural recharge (Arreguín-Cortés et al., 2020). Groundwater availability remains a key variable for the assignment of national water rights through concession and permitting systems.

Mexico receives an average of 1,449,471 million m³ of precipitation annually. However, this input is highly seasonal, with approximately 68 % of total rainfall occurring between June and September. This concentration of rainfall presents major challenges for storage, regulation, and year-round distribution. Of the total precipitation, around 72.1 % is lost to evapotranspiration, 21.4 % flows as surface runoff, and only 6.4 % infiltrates to recharge aquifers. After accounting for cross-border water

exchanges, the country's annual volume of renewable freshwater is estimated at 451,584.7 million m³ (CONAGUA, 2022). From a geographic perspective, national-level indicators tend to obscure local disparities that are critical for operational water management. In 2023, the estimated per capita renewable water availability was 3,569 m³/inhab/year, although this average does not reflect wide variation among hydrological regions (IMCO, 2023).

The imbalance in water distribution, with a dry northern half and a wetter southern portion, creates a complex scenario for water governance. Even in areas with relatively abundant water, challenges such as pollution, inefficient use, and infrastructure deficiencies persist. As a result, water management in Mexico is shaped not only by physical scarcity but also by structural mismatches between water supply, economic activity, and population distribution (Nava, 2006). These issues are further intensified by the continued overexploitation of aquifers, which undermines the long-term sustainability of the country's water resources. Water demand in Mexico reflects this uneven distribution of resources. Agriculture accounts for nearly three-quarters of total withdrawals, largely concentrated in arid and semi-arid regions where irrigation is essential, while urban and industrial demand has risen steadily due to population growth and economic expansion in water-scarce central and northern areas (Bravo-Cadena et. al, 2021; CONAGUA, 2024). This imbalance between resource availability and demand intensifies competition among users, contributes to groundwater overexploitation, and complicates efforts to ensure equitable and sustainable allocation across sectors.

2.3 Water legal framework

The governance of water in Mexico is grounded in the Political Constitution of the United Mexican States, which establishes a decentralized legal framework involving the federal, state, and municipal levels of government. Article 27 affirms that national waters are the property of the Nation, under the custody and administration of the federal government. Article 4, paragraph 6, formally recognizes access to water and sanitation as a human right, guaranteeing that all individuals are entitled to sufficient, safe, acceptable, and affordable water for personal and domestic use (Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión, 2021).

Crucially, Article 115 delegates to municipal governments the responsibility for providing public services, including the supply of drinking water, drainage, sewage, treatment, and the disposal of wastewater. Section III (a) of this article enables municipalities to manage these services directly or through the establishment of decentralized operating agencies—public, private, or mixed—created by municipal decree and formalized in official gazettes (Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión, 2021). This legal framework defines a multilevel governance system in which the federal government retains ownership and regulatory control over water resources, with the National Water Commission (CONAGUA) serving as the principal federal authority. At the same time, states and municipalities are responsible for implementation, service provision, and infrastructure operations at the local level.

2.4 Water laws

Building upon constitutional mandates, Mexico's water governance is shaped by a series of federal legal instruments that define the mechanisms for water allocation, regulation, use, and protection. The National Water Law (LAN) serves as the foundational legal statute for managing national waters. It establishes the principles and institutional arrangements for integrated water resource management, requiring that all extractions and discharges be authorized through concessions issued by the National Water Commission (CONAGUA). The LAN also provides legal tools to ensure hydrological sustainability, including the declaration of prohibitions in overexploited areas, the establishment of reserves for ecological or public use, and the issuance of regulations that define conditions for water use under specific hydrological or ecosystem contexts (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010).

Complementing this framework, the Federal Rights Law (LFD) defines the financial architecture of water management in Mexico. It determines the allocation of abstraction and pollution discharge fees, sets the boundaries of water availability zones, and operationalizes the principles of "user pays" and "polluter pays." Article 223 of the LFD stipulates that revenues generated from the use of national waters are allocated to the Federation and earmarked for investments in hydraulic infrastructure and sectoral programs (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010). First enacted in 1981 and most recently amended in 2022, the LFD has become a central fiscal tool for incentivizing efficient and equitable water use.

Regulatory oversight is further reinforced by Mexican Official Standards (NOMs), which define enforceable parameters for water quality, wastewater discharges, service provision, and operational safety. Several NOMs explicitly regulate both surface and groundwater, establishing maximum permissible concentrations of contaminants, sanitary monitoring protocols, and technical guidelines for discharge control. These technical instruments provide the methodological basis for compliance monitoring, risk mitigation, and performance benchmarking for water utilities and public agencies. The most relevant include NOM-127-SSA1-2021 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2022), which sets maximum permissible limits for contaminants in drinking water; NOM-001-SEMARNAT-2021 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2022), which regulates pollutant discharges into national water bodies; and NOM-014-CONAGUA-2003 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2003), which establishes criteria for artificial recharge of aquifers. Compliance is enforced through a combination of monitoring programs, concession requirements, and inspection mechanisms carried out by CONAGUA and health authorities.

At the state level, additional legislation supports the decentralization of water services. Each federal entity enacts a Drinking Water and Sewerage Law, which outlines the institutional arrangements for service delivery and, in some cases, authorizes the creation of autonomous public bodies to manage water supply and sanitation systems. These laws help align state policies with federal legislation while addressing local governance and infrastructure realities (Camacho & Casados, 2017).

2.5 Institutions and Water Utilities (WU)

The institutional architecture of the water sector in Mexico involves a wide range of actors operating at different levels of government. At the federal level, the National Water Commission

(CONAGUA) serves as the lead agency responsible for issuing water use concessions, monitoring regulatory compliance, managing federal hydraulic infrastructure, and formulating the National Water Program, which sets strategic policy objectives for each six-year federal administration. CONAGUA also interfaces with state and municipal authorities, coordinates basin-level management through its regional organizations, and oversees the implementation of reserves, prohibitions, and regulatory zones. CONAGUA is responsible for integrating the National Water Information System (SINA), which compiles standardized data on water quantity, quality, use, and conservation in line with transparency and statistical legislation.

Other federal institutions play important roles in water governance. The Ministry of Finance and Public Credit (SHCP) is responsible for fiscal regulation and authorizes CONAGUA to collect water use fees. The Federal Congress reviews and approves legal amendments and national water budgets. Agencies such as the National Infrastructure Fund (FONADIN), the Federal Attorney for Environmental Protection (PROFEPA), and the Welfare Secretariat support infrastructure financing, environmental enforcement, and social water programs. The Mexican Institute of Water Technology (IMTA) contributes to the system by generating research, innovation, and capacity-building tools for water resource sustainability (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010).

At the state level, governments are responsible for planning, regulation, infrastructure development, and in many cases, direct service provision. State legislatures may determine tariff structures, although some states delegate this authority to technical commissions or specialized regulatory bodies, such as the Chihuahua Central Water and Sanitation Board (JCAS), which oversees tariff setting and supervises municipal water utilities (H. Congreso del Estado, 2023).

Municipalities are the legally mandated providers of drinking water, sewerage, and sanitation services, as established by Article 115 of the Constitution and reinforced by the 1983 constitutional reform (Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión, 2021). To fulfill this role, many municipalities have created decentralized water utilities (WU) with their own legal status, financial autonomy, and administrative capacity. These agencies are responsible for service delivery, fee collection, infrastructure maintenance, and in some cases, wastewater treatment and reuse.

WU are key operational actors in the sector, particularly in urban areas. In densely populated regions, para-municipal organizations manage service delivery, exhibiting a wide range of technical, commercial, and financial capacities. While a few utilities have achieved institutional consolidation and financial self-sufficiency, the majority face challenges related to underinvestment, inefficiencies, and limited operational autonomy. Private participation in the sector remains marginal, with only a few concessions operating in major metropolitan areas (Barkin, 2005). Despite these challenges, WUs remain central to the realization of the human right to water and the implementation of national and state water policies (Camacho & Casados, 2017).

3. Water management challenges in Mexico

3.1 Scarcity, vulnerability, quality, and future demand

Water scarcity in Mexico arises from a combination of governance and socioeconomic inequalities, regional imbalances in availability and demand, and mounting pressures from climate

variability and population growth. These interrelated factors have deepened the country's vulnerability to hydrological stress. Water use in urban areas illustrates pronounced socioeconomic disparities. High-income neighborhoods in large cities often consume more than 300 l/inhab/day, far exceeding international benchmarks (Magaña et al., 2024). Meanwhile, marginalized communities in the same cities frequently face deficient service coverage and fall below minimum recommended supply levels. This imbalance reflects not only distributional inequality, but also a long-standing reliance on supply expansion as the dominant water management strategy. Rather than addressing demand through efficiency measures or behavioral change, authorities have historically focused on increasing water availability to satisfy rising consumption (Aguilar-Barajas & Ramírez, 2021; Medina-Rivas et al., 2022). This approach has contributed to chronic water deficits over time and has led to socioeconomic drought conditions, even in the absence of meteorological drought (Magaña, 2016). In 2020, agriculture accounted for nearly 77 % of national withdrawals, followed by industry (approximately 10 %) and domestic use (13 %) (CONAGUA, 2022), illustrating how sectoral demand patterns intensify pressure on already scarce supplies.

Sustainable water resource management in Mexico must consider three critical dimensions: temporal variability, spatial distribution, and scale of analysis. Rainfall is highly seasonal, with most precipitation concentrated between June and September, generating significant intra-annual variability. Regions such as the southeast receive abundant rainfall but host relatively low population densities and limited demand. Conversely, arid and semi-arid zones in the north and center experience chronic water stress. From a governance perspective, water challenges are primarily local. National averages often mask acute subregional disparities, highlighting the need for basin-level diagnostics and targeted, locally adapted interventions (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

The agricultural sector, which accounts for approximately 77 % of total water withdrawals, remains a major source of pressure on available water resources (Bravo-Cadena et al., 2021). Despite its economic relevance, the sector faces increasing pressure to improve productivity with less water in response to population growth and shifting climatic conditions. Water stress is particularly severe in the northern and central regions, where high demand intersects with limited natural supply and recurring drought conditions (Aguilar-Barajas et al., 2016; Cotler et al., 2022).

Additional pressure stems from the weak enforcement of water rights and concessions. In some basins, withdrawals exceed authorized volumes, or water allocations are granted despite insufficient hydrological availability. These challenges are compounded by extreme events such as droughts and hurricanes, which further disrupt surface and groundwater systems. Although the country's national water stress level is reported at 17 %, regional disparities are much more pronounced. The north, northwest, and central regions experience stress levels approaching 47 %, indicating critical vulnerability (CONAGUA, 2019; Arreguín-Cortés, et al., 2020).

Long-term trends also show declining per capita water availability. Over the past five decades, average renewable water availability per inhabitant has decreased by approximately 18,500 m³ per year (CONAGUA, 2019). Mexico City is one of the most vulnerable regions, with the lowest average annual availability of water per capita, estimated at only 141 m³/inhab/year. This is a significant contrast to Chiapas, which has the highest renewable water availability, with 19,140 m³/inhab/year (CONAGUA, 2024).

Moreover, Mexico is grappling with challenges related to quality. Pollution from agricultural activities and untreated sewage has led to environmental damage and health problems (Bravo-

Cadena et al., 2021). Water contamination is limiting the availability of water, with 70 % of water bodies exhibiting some degree of contamination, as reported by the surface water quality measurement network in Mexico by CONAGUA (Arreguín-Cortés et al., 2020). This monitoring program evaluates a range of physical, chemical, and biological parameters (such as nutrients, heavy metals, organic matter, and microbial indicators), which together provide the basis for reporting contamination levels across the country. Additional pressure also stems from the degradation of rivers due to untreated municipal wastewater, industrial effluents, and diffuse agricultural pollution. Although Mexican Official Standards, such as NOM-001-SEMARNAT-2021, regulate wastewater discharges and NOM-127-SSA1-2021 establishes drinking water quality criteria, setting enforceable parameters, monitoring, and compliance remain limited. Many discharges exceed permissible limits without sanction, and enforcement responsibilities are often fragmented between CONAGUA, Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT), and state authorities. This institutional weakness, coupled with insufficient inspection capacity, results in limited accountability for contamination and undermines the effectiveness of the legal framework in protecting water quality.

Future water demand poses an additional challenge. Mexico's population is projected to grow from 126.2 million in 2020 to 151.4 million by 2050, representing an increase of more than 20 % (United Nations, 2019). Consequently, water demand in all sectors is expected to rise, leading to increased water stress in some regions. This situation is particularly concerning in the central and northern regions, which are already experiencing high levels of water stress.

3.2 Politics and policies discrepancy

There is an increasing number of conflicts and competition for water, involving the three levels of government and water users. Transboundary basins and aquifers further exacerbate the situation, leading to disputes. To manage water resources effectively, the legal framework needs updating as it is complex and difficult to implement (Arreguín-Cortés et al., 2020). One of the major issues is the subsidized price for pumping underground water for irrigation, which provides incentives for increasing the volume of water pumped (Rosas & Günther, 2020). This policy needs coordination with other sectors, such as agriculture. Another critical issue is the efficiency of irrigation infrastructure, which causes significant losses and exacerbates water use (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010; Bravo-Cadena et al., 2021).

According to Rosas and Günther (2020), reducing the number of water permits available for irrigation is essential to reduce water stress. However, this is politically difficult as it would reduce the surface available for agriculture. Water users must change their perception of aquifers and recognize them as a reserve for periods of scarcity, rather than an ordinary source of water. Given the circumstances, Mexico developed a framework for allocating water resources due to the need to distribute limited water among a diverse group of users. However, authorities face challenges in regulating large water users and managing the culture of irresponsibility among consumers who do not pay for water use (Barkin, 2012).

The technical and political features of the Mexican system exacerbate the problem of the allocation of water resources. Constitutionally, water resources are owned by the nation and subject to political control. With the urban expansion and industrial growth, new water demands have led to the emergence of a lucrative "parallel" market, leading to the transfer of some of these water rights for

commercial and industrial purposes (Barkin, 2005; Barkin, 2012). Despite having a range of laws and regulations governing water resources, there is often weak enforcement and monitoring of compliance, which can lead to abuses and overexploitation of water resources.

3.3 Technical and operational challenges of WU

The human right to water is a fundamental element that has been established by various international treaties and declarations and is reinforced by the laws of Mexico. This constitutional mandate has significant legal and technical implications on the water sector in Mexico (Camacho & Casados, 2017). According to Briseño and Sánchez (2018), WU were established to address the longstanding difficulties in the political management of water services.

These organizations were designed to strive for characteristics such as autonomy, democratization of administrative councils, reinvestment of resources captured in the collection of water, approval of rates by boards of directors, financial self-sufficiency, and greater technical and administrative capacity. However, the decentralization of water management in Mexico has not met the ideal profile, resulting in unsatisfactory performance by several organizations (Barkin, 2005; Barkin, 2012; Briseño & Sánchez, 2018; Arreguín-Cortés et al., 2020). The performance of these institutions mismatches between ecosystem processes and management scales, for example, the rules, laws, policies, and formal and informal cultural norms, which govern the spatial and temporal extent of resource access rights and management responsibilities (Cotler et al., 2022). According to Camacho and Casados (2017), the institutional framework in which the water utilities operate does not promote efficiency; key players do not aim for good performance, and selection methods and criteria do not consider technical factors (Salazar-Adamas, 2021).

3.4 Financial challenges of WU

The financial sustainability of WU in Mexico remains a critical bottleneck to achieving universal, efficient, and equitable water services. One of the central institutional mechanisms for managing water finances is the fee system for water abstraction and discharge, which is regulated by CONAGUA. Any use of national waters requires a permit from CONAGUA, which collects these fees and redistributes them for infrastructure development and water management programs (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010).

Despite this system, WU across the country faces systemic financial challenges. The most pressing issue is the lack of full cost recovery through user fees, which hinders their capacity to cover operational costs and severely limits their ability to secure third-party or commercial financing. As a result, the sector remains heavily dependent on government subsidies sourced from tax revenue, petroleum royalties, and earmarked federal programs managed by CONAGUA (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010; Silva Rodríguez, 2017).

Billing inefficiencies exacerbate this challenge. A significant proportion of WUs continue to rely on analog metering technologies and manual billing processes, characterized by measurement errors, unaccounted-for water, and revenue losses. In many municipalities, the absence of automated or digital billing platforms restricts consumer access to real-time consumption data and inhibits timely payment. These systemic inefficiencies contribute to elevated non-revenue water levels and

suboptimal cash flow (IMCO, 2023). These challenges are provoked by user-side non-payment, often linked to low tariffs and politically tolerated, and from weak enforcement mechanisms by authorities, resulting in a structural imbalance that prevents WUs from achieving cost recovery and entrenches their dependence on subsidies.

Subsidy schemes also demonstrate poor allocative efficiency. In practice, generalized subsidies disproportionately benefit high-consumption users—especially in the agricultural sector—fostering perverse incentives for over-abstraction and contributing to the depletion of aquifers (Briseño & Sánchez, 2018). The absence of income-targeted subsidies undermines equity and fails to prioritize vulnerable populations, such as low-income households and smallholder farmers. Moreover, spatial asymmetries in financial management are evident: some federative entities collect relatively high volumes of water-related revenues but exhibit low reinvestment ratios in hydraulic infrastructure or service quality improvements (IMCO, 2023). In recognition of these constraints, national authorities have promoted mechanisms to attract private sector engagement and mobilize commercial finance (Camacho & Casados, 2017). Nonetheless, private capital flows into the water sector remain negligible. Investment has primarily occurred via public grants and co-financing schemes administered by CONAGUA. WU, constrained by weak credit profiles and fiscal rigidity, faces difficulties in accessing capital markets or obtaining project-based loans. In several instances, municipal governments have resorted to general-purpose debt issuance to cross-subsidize water infrastructure, albeit without long-term sustainability plans.

Budgetary allocations at the federal level further illustrate the sector's fiscal fragility. In 2020, the approved federal budget for water and sanitation infrastructure totaled 6,938 million pesos—representing only 9 % of the estimated financing needs identified by the National Association of Water and Sanitation Utilities (ANEAS, 2020). The historical trajectory of public investment in the sector reveals a downward trend; between 2012 and 2020, federal budget allocations declined by nearly 80 %, constraining expansion, rehabilitation, and climate resilience planning (ANEAS, 2020). Operational deficits are widespread. According to estimates from IMTA and SEMARNAT (2018), 90 % to 95 % of municipal water utilities operate in deficit, unable to recover the economic cost of service provision. Underinvestment in infrastructure correlates with reduced continuity, water quality issues, and declining user satisfaction. These challenges are magnified by exogenous pressures, including accelerated urbanization, demographic growth, climate variability, and social conflict over water rights and allocation (Cotler et al., 2022). Local political dynamics and fiscal constraints further inhibit WU's capacity to adjust tariffs, restructure debt, or upgrade infrastructure. Addressing these constraints requires a multifaceted strategy involving tariff reform, metering modernization, digital infrastructure investment, results-based subsidies, and improved fiscal coordination among federal, state, and municipal levels.

3.5 Socio administrative vulnerability

Mexico's water resource management is facing significant vulnerability due to inadequate social participation and limitations in the current administration model. These issues arise from the lack of clarity in regulations, roles, organizational structures, and coordination mechanisms among various actors involved in environmental matters. Furthermore, inadequate cooperation and coordination among government levels, sectors, public and private actors, and the absence of participation by social and private actors in decision-making processes exacerbate the situation

(Rosas & Günther, 2020). Minimal transversality of strategies and actions in other sectors of the economy and the water authority further adds to the problem (Barkin, 2012; Pfaff et al., 2019; Rosas & Günther, 2020).

Although Mexico has experience managing watersheds in rural areas with a strong emphasis on community governance, expanding these efforts to include urban centers in the watershed management process is a major challenge. Achieving this goal requires the creation of new collaborative governance structures that can effectively engage with city governments and other urban stakeholders.

A more holistic ecosystem approach to water and development is needed, maintaining a beneficial mix between natural and man-made infrastructure to maximize benefits. Conflicts in the water and sanitation sector often originate from chosen economic and social development models, leading to questions about the legitimacy and functions of institutions and precepts contained in various laws and regulations. Bureaucratic design that hinders agility in decision-making creates fertile ground for social conflicts in the water and sanitation sector (Barkin, 2012; Arreguín-Cortés et al., 2020). To address these issues, greater participation by users is needed to communicate to stakeholders the need to compromise on measurement, efficiency, and actions based on a basin-wide vision.

However, the latest reform to the National Water Law (2023) falls short in terms of promoting effective public participation. While representatives of users and organized society are allowed to attend meetings of the Basin Council and the Consultative Council of the Basin Organization, they only have a voice and no vote. Similarly, the General Assembly of Users is limited to issuing recommendations (ANEAS, 2008). Despite the multiple benefits of water representatives and organized society, their potential cannot be achieved without the participation of authorities and water users.

4. The way forward

4.1 Enhance water infrastructure and the development of new storage reservoirs

Recent trends in public spending on the water sector in Mexico reveal an imbalanced allocation of financial resources, with a disproportionate emphasis on the construction of new hydraulic infrastructure and insufficient investment in its operation, maintenance, and management (Arreguín-Cortés et al., 2020). To ensure long-term water security, it is essential to prioritize the modernization of existing infrastructure, expand water storage capacity through the development of new reservoirs, and improve the operational efficiency of distribution networks. The deterioration of aging infrastructure represents a critical challenge. According to IMTA and SEMARNAT (2018), approximately 50 % of municipal hydraulic networks require renewal due to the expiration of their regulatory service life, largely attributable to prolonged neglect and underfunding. Targeted investments in rehabilitation and preventive maintenance are therefore essential to restoring the reliability and functionality of water systems.

According to data reported by CEPAL (2023), public investment in the water sector, excluding expenditures by utilities or state governments, indicates that between 2018 and 2020, a total of USD 3.5 billion was allocated to the sector. PROAGUA is a federal subsidy program designed to expand

and strengthen municipal water and sanitation services. Between 2018 and 2020, it disbursed USD 224 million in rural areas, USD 443 million in urban areas, and USD 151 million to support the comprehensive development of utilities, wastewater treatment plants, and water disinfection systems. PRODDER is a federal program that allocates revenues collected from fees for the abstraction and use of national waters back to water and wastewater service providers. These revenues are collected by CONAGUA under the Federal Rights Law as payments for the right to use national waters. These funds are returned to WU providers to improve operational efficiency and invest in drinking water, sewage, and wastewater treatment infrastructure. From 2018 to 2020, PRODDER allocated USD 605 million to such initiatives (Fernández, et al., 2023).

Despite these efforts, total public investment in the sector declined by 41 % over the same period. The reduction in federal transfers alone accounts for a 36 % drop compared to 2018, equating to a decrease of USD 5.12 per capita. This downward trend is particularly concerning in the context of aging infrastructure, population growth, and increasing climate variability.

Achieving sustainability in water resource management requires stable and sufficient funding. From 2014 to 2018, CONAGUA's annual budget fell from 55.6 billion to 32.3 billion pesos (CONAGUA, 2019). Nonetheless, fiscal instruments linked to the abstraction and use of national waters have demonstrated revenue-generating potential. Between 2012 and 2018, revenues from user contributions consistently exceeded the financial requirements of governmental water programs, reflecting a net surplus in the water governance budget (Fig. 1). This suggests that, with appropriate mechanisms, the sector possesses untapped financial capacity to meet infrastructure demands and strategic water management goals.

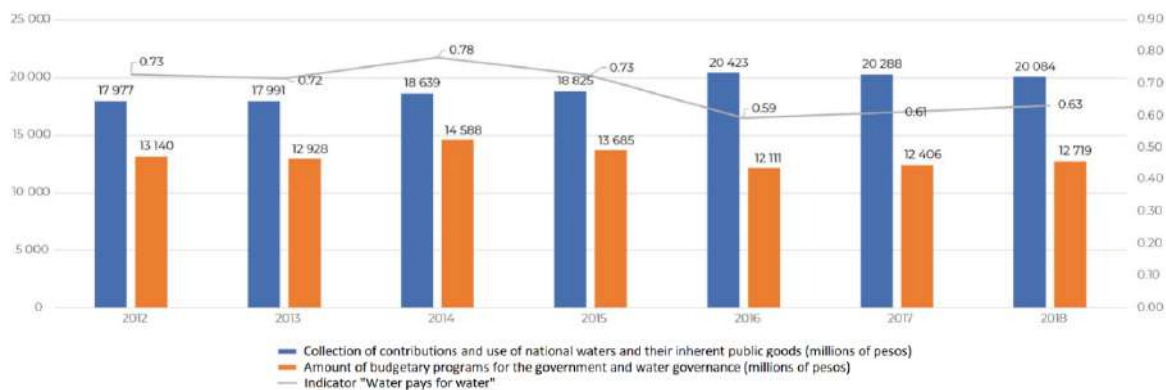


Figure 1. Relationship between budgetary programs tied to government and water governance with respect to revenue collection, indicator "Water Pays for Water" (at constant 2018 prices). (CONAGUA, 2019).

Figura 1. Relación entre los programas presupuestarios vinculados al Gobierno y la gobernanza del agua con respecto a la recaudación de ingresos, indicador «El agua paga por el agua» (precios constantes de 2018). (CONAGUA, 2019).

To optimize resource utilization, investments should prioritize the implementation of water conservation measures, promotion of efficient water use practices, and exploration of alternative water sources, such as wastewater recycling and desalination. Arreguín-Cortés et al. (2020) estimate that achieving sustainability and water security in Mexico would require at least 24 years of investment, until 2042, with an infrastructure cost of 48.8 billion pesos. Furthermore, the costs of

operation and maintenance of existing works, estimated at 17 billion pesos, must be considered. It is also necessary to allocate resources for water administration and law enforcement, measurement of the hydrological cycle, water planning, social participation, research, education, and capacity building, as well as promoting a water culture. Collaboration among governments, international organizations, and private entities is essential to secure the necessary financial resources and ensure their effective allocation and utilization. To reinforce accountability and encourage responsible water usage, it is imperative to direct proceeds from water usage fees and discharges directly to the water sector.

4.2 Ensuring controlled groundwater pumping

The uncontrolled pumping of groundwater presents a significant challenge in water resource management. Addressing this issue requires the implementation of strict regulations and monitoring systems to effectively manage and regulate the extraction of groundwater resources, thereby preventing overexploitation and depletion (Janjua et al., 2021). This includes the establishment of extraction limits and the promotion of sustainable groundwater management practices through awareness campaigns and policy interventions (Zamora Sáenz & Sánchez Gálvez, 2020). Another critical aspect to consider is the improvement of irrigation infrastructure efficiency. Currently, irrigation networks experience considerable losses, and given that irrigation accounts for most of the water use in Mexico, better management of irrigation practices could have a substantial impact on reducing water demand and alleviating water stress. In 2018, approximately 36.6 % of the water allocated for group agricultural use was sourced from underground sources. Despite annual variations, the volume of groundwater granted for this purpose increased by 18.0 % compared to 2009 (CONAGUA, 2019). The current water extraction rights in agriculture lack consistent payment obligations, resulting in a lack of administrative payments. This oversight encourages excessive groundwater utilization by farmers, disregarding long-term sustainability. To promote responsible and efficient water use in agriculture, it is crucial to determine the actual costs linked to groundwater extraction.

4.3 Water should be treated as having an economic and social value.

Recognizing and valuing water both economically and socially is crucial for effective water management. This paradigm shift acknowledges water as a finite resource with intrinsic worth, playing a vital role in societal well-being and economic development (Yu Wang et al., 2022). Assigning value to water enables decision-makers to prioritize its efficient and responsible allocation, incentivize conservation, promote sustainability, and ensure equitable access. A comprehensive reassessment of current practices is necessary to identify and rectify systemic deficiencies hindering sustainable water management.

4.4 Public awareness about water management

Raising awareness about responsible water use, conservation, and the challenges of water scarcity is crucial for effective water management (Briseño & Sánchez, 2018). This can be achieved through targeted educational campaigns, public outreach programs, and the dissemination of

accurate information on water resources. Transparent information on urban water sources fosters connection and responsibility among residents (Zamora Sáenz & Sánchez Gálvez, 2020). Promoting awareness of water sources empowers individuals to make informed choices and contribute to sustainable water management.

Understanding current and projected water availability is essential to address water scarcity. Comprehensive and up-to-date data identify scarcity hotspots and inform conservation efforts, efficient water use practices, and alternative water sources. Participatory governance ensures long-term water management sustainability (Yu Wang et al., 2022).

4.5 Address inequitable distribution and inefficient water use

The inefficient use and inequitable distribution of water in Mexico contribute not only to significant resource wastage but also to growing socio-political tensions. These issues are particularly pronounced in the irrigation sector and in regional water distribution systems, where disparities in allocation generate a sense of deprivation and marginalization among specific communities. Such imbalances not only undermine social cohesion but also promote unsustainable water practices and poor resource use. Effectively addressing these challenges requires a differentiated, regionally tailored approach that accounts for hydrological, demographic, and economic asymmetries. Disparities are particularly acute in northern and central Mexico, which host more than 77 % of the national population and generate over 82 % of the country's GDP, yet suffer from the lowest levels of water availability (Arreguín-Cortés et al., 2020). These regions must therefore be prioritized in the design and implementation of national water policies.

The degradation of water quality further exacerbates the problem. According to data from CONAGUA, over 70 % of surface water bodies in Mexico exhibit some degree of contamination, largely due to untreated municipal wastewater, industrial discharges, and agricultural runoff (Cervantes-Jiménez et al., 2020; CONAGUA, 2022). This environmental deterioration jeopardizes both public health and ecosystem integrity, particularly in areas of high agricultural and industrial activity. Consequently, integrated water resource management must address both the quantity and quality dimensions of water governance. Institutional and technical improvements are required to support better decision-making. This includes the development of robust, up-to-date databases on water availability, use, and quality at the basin and municipal levels. Accurate and timely information is essential for monitoring progress, identifying critical areas, and designing responsive programs tailored to specific regional conditions (Chen & Bilton, 2022).

Investments in scientific research and technological development are key drivers of improved water governance. Expanding the application of precision metering, geospatial monitoring systems, and real-time analytics will enhance the detection of inefficiencies, track losses, and support performance-based management (Janjua et al., 2021). These technologies enable the systematic collection of data on consumption patterns, aquifer levels, contamination hotspots, and infrastructure performance. Valuable insights gained from these measurements will inform decision-makers and enable targeted interventions to reduce losses and enhance overall water management efficiency (Sánchez et al., 2022). The use of verified technical information enables more equitable resource distribution, supports the prioritization of infrastructure investments, and informs conservation efforts aligned with regional needs. Ultimately, aligning technological advancement with institutional coordination

and political commitment offers a viable path to addressing inefficiencies, rectifying distributional inequities, and ensuring long-term water security for all sectors of society.

4.6 Tariff structure and financial considerations for improved water management

Most WU in Mexico do not cover operating expenditures with revenues from tariffs; the two main reasons for this are poor operating efficiency and tariffs that are not sufficient to cover reasonable costs of service (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010). To address these challenges, it is essential to design a modern tariff structure that reflects the real cost of water production and delivery while accounting for user consumption patterns and financial sustainability (Camacho & Casados, 2017). Establishing tariff rates that reflect the true economic value of water is imperative. Adequate and reasonable rates not only secure the financial viability of service providers but also enable them to maintain, rehabilitate, and expand infrastructure to meet growing demand (Briseño & Sánchez, 2018). Without such adjustments, utilities remain dependent on public subsidies, thereby constraining their capacity to operate autonomously and efficiently. In parallel, transparency in the methodologies and criteria used to determine tariffs must be strengthened to promote user trust and institutional accountability.

The agricultural sector, which holds 76 % of all potable water concessions and consumes most of the national water supply, presents a particular challenge. It is essential to move toward the implementation of cost-recovery pricing for agricultural water use, structured according to consumption volumes, user category, and aquifer condition. Differentiated pricing would serve as an economic signal to encourage water-saving practices among both large and small-scale users. Moreover, the current subsidy system disproportionately benefits high-volume users rather than vulnerable populations (IMCO, 2023). Redesigning subsidies to ensure that low-income households and small agricultural producers receive targeted support would enhance equity without compromising environmental sustainability. Rates that fail to reflect the full cost of supply are often compensated by federal transfers; however, this model is not sustainable in the long term, especially under conditions of increasing water scarcity and climate variability.

Electricity tariffs for groundwater pumping, particularly in overexploited aquifers, must also be revised (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010). Establishing consumption-based brackets can encourage more rational use. Low-consumption users would benefit from preferential rates, while high-volume consumers and operations in stressed aquifers would pay proportionally higher rates. Similarly, water tariffs in the industrial sector should be subject to annual evaluations that account for regional water stress, aquifer status, and supply-demand dynamics. This would help determine whether current pricing is sufficient to finance operations and incentivize more efficient use. A key institutional improvement lies in strengthening the role of CONAGUA in collecting, updating, and analyzing information related to tariffs, including the methodologies used by each entity. Comprehensive and transparent databases would allow for evidence-based reviews and rate adjustments that respond to changing hydrological and economic conditions. To ensure that tariff collection aligns with expenditure responsibilities, enhanced coordination is needed between CONAGUA and the Ministry of Finance (SHCP). State-level planning must consider future scenarios of drought, population growth, and water stress to allocate resources more equitably and strategically, prioritizing the region's most at-risk (IMCO, 2023). In turn, municipalities should be supported through technical training and institutional development programs aimed at modernizing

their billing, metering, and monitoring systems. Upgrading these administrative and technical capabilities would increase collection efficiency, reduce losses, and foster greater user compliance through accurate measurement and timely billing (Yu Wang et al., 2022).

Ultimately, revising the tariff structure and addressing financial bottlenecks are indispensable steps toward achieving universal, efficient, and resilient water services. An integrated, transparent, and performance-based approach to pricing will ensure that the sector is adequately funded while promoting conservation, equity, and sustainability (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010).

4.7 Sustainable growth in relation to water resources

The adoption of a new management model is necessary for sustainable growth. This model should prioritize self-sustainability and quality of service, placing a strong emphasis on water safety and the long-term viability of water resources. By integrating innovative approaches and advanced technologies, can ensure the provision of high-quality water services that effectively meet the needs of the population (IMTA & SEMARNAT, 2018). Improving water availability predictions and establishing independent monitoring systems are vital steps towards efficient resource allocation. Accurate predictions of water availability enable informed decision-making, ensuring optimal utilization of the available resources. Additionally, developing mechanisms for incorporating cities into watershed management is essential. Recognizing the impact of urban areas on surrounding watersheds, collaborative efforts between cities and water management entities can lead to improved water resource management and environmental sustainability (Cotler et al., 2022). By integrating urban planning, stormwater management, and wastewater treatment into watershed management strategies, Mexico can optimize water usage and mitigate the negative impacts of urbanization on watersheds. To ensure sustainable development, it is crucial to align development activities with technical studies regarding water availability. Decision-making processes should be based on sound scientific evaluations that consider the availability of water resources (Mumbi et al., 2021; Yu Wang et al., 2022). By incorporating these studies into development planning, Mexico can harmonize growth and economic activities with the available water resources, minimizing negative impacts on the environment.

4.8 Improve WU

Inefficient water management practices and financial challenges faced by WU undermine the sustainability of the water sector (Chopra & Ramachandran, 2021). The significant losses of drinking water contribute to financial insolvency, health risks, and environmental degradation, emphasizing the urgency for corrective measures. In Mexico's WU, the physical efficiency is only 52.7 %, resulting in 47.3 % of water being unbilled due to leaks. Moreover, the commercial efficiency stands at 76.3 %, indicating that approximately a quarter of billed water remains uncollected. These losses have detrimental effects on the financial viability of WU, as their average income covers only part of the production costs, necessitating government subsidies to bridge the gap (Briseño & Sánchez, 2018). Strengthening governance structures and exploring innovative funding mechanisms are necessary to address economic deficits and ensure financial stability. Establishing a stable legal framework that empowers operating organizations to fulfill their technical, operational, administrative, financial, and investment functions is essential (Zamora Sáenz & Sánchez Gálvez, 2020). Ensuring returns on

investment and generating resources for technological advancements, infrastructure rehabilitation, and equipment automation are vital for service improvement and cost optimization (IMTA & SEMARNAT, 2018; Arreguín-Cortés et al., 2020).

In addition to addressing economic challenges, enhancing service quality is crucial to meet growing demands and user expectations. Infrastructure improvements, operational optimizations, and robust monitoring systems should be prioritized to enhance reliability and customer satisfaction (Camacho & Casados, 2017). To achieve efficient WU, it is essential to professionalize the personnel in key positions within the organization. By investing in the professional development of staff, the agencies can make informed decisions and implement water management strategies that align with best practices. Involving civil society experts in water management governance is vital (Hernández-Cruz, et al. 2022). Establishing an autonomous institution with multidisciplinary experts ensures comprehensive decision-making based on technical criteria rather than political interests. The absence of comprehensive policies and effective institutions regulating WU hinders progress (González-Villarreal & Arriaga-Medina, 2014; Briseño & Sánchez, 2018). It is imperative to establish robust regulatory frameworks and governing bodies to enforce standards in the water sector.

4.9 Improve public policy

The current fragmented nature of policies and regulations poses significant challenges to the sustainable use and allocation of water resources. To overcome this, Mexico needs to streamline and harmonize the legal framework on water and environmental matters, creating a unified approach that encourages integrated water management strategies across all levels of governance. Addressing the complex issue of water allocation requires collaborative efforts and consensus among stakeholders (IMCO, 2023). Establishing a national framework for water allocation, where decisions are made collectively while considering the diverse needs and priorities of various sectors and regions, is crucial. An essential aspect of achieving effective water management is improving the water rights allocation system. The current system has several gaps, such as unauthorized water uses and inefficient allocation mechanisms (CONAGUA, OECD, and IMTA, 2010). To rectify these issues, Mexico must revisit and refine the system, implementing a fair and transparent water rights allocation system.

The legal framework at the federal, state, and municipal levels plays a pivotal role in shaping water management practices. Modifying the water policy is necessary to strengthen the objectives and strategies of water management institutions. Furthermore, amending the General Water Law will provide a robust legal foundation that can effectively address emerging challenges and promote sustainable water practices in Mexico (Zamora Sáenz & Sánchez Gálvez, 2020). To ensure effective water management, it is vital to strengthen governance structures. This involves enhancing institutional capacities, promoting transparency, and fostering meaningful stakeholder engagement. A critical aspect of water management in Mexico involves reviewing and updating the water sharing agreements of transboundary basins (Zamora Sáenz & Sánchez Gálvez, 2020). As water resources do not conform to political boundaries, collaborative agreements between neighboring countries are essential. By revisiting and updating these agreements, Mexico can address emerging challenges, adapt to changing circumstances, and foster equitable and sustainable water sharing practices.

5. Conclusion

Mexico faces persistent challenges in the sustainable management of its water resources, entrenched in a historical imbalance between availability and demand, institutional fragmentation, and chronic underinvestment in infrastructure and governance. Despite ongoing reforms, inefficiencies in service delivery, financial deficits in water utilities, and unequal access, particularly in arid and densely populated regions, continue undermining water security. These issues are further compounded by climate variability, aquifer depletion, and widespread water quality degradation. Overcoming these challenges requires integrated, basin-scale planning; strengthened inter-institutional coordination; and the implementation of equitable, efficiency-driven policy instruments. Enhancing local governance, modernizing tariff structures to promote financial sustainability, and adopting data-informed management tools are essential to improving service reliability and resilience. Crucially, a management model centered on self-sufficiency, water security, and long-term urban and watershed viability must be adopted. Institutional reforms should prioritize transparency, accountability, and democratic participation in decision-making processes. Through such structural transformations, Mexico can advance toward sustainable water governance, ensuring the protection, equitable distribution, and long-term viability of its water resources. The scope of this article is limited to disclosing the current performance and governance capacity of Mexico's water institutions; therefore, while regulatory frameworks and water quality standards are acknowledged, their detailed technical evaluation and comparative analysis with international cases lie beyond its purpose. Future research should address these dimensions to complement institutional perspectives and provide a more comprehensive understanding of water governance.

Acknowledgment

We extend our sincere gratitude to the anonymous editors and reviewers for their invaluable insights and professional comments.

Conflict of interest

The authors declared that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. No financial, personal, or professional relationships have influenced the content or interpretation of the research presented.

6. Reference

- Aguilar-Barajas, I., & Ramírez Orozco, A. (2021). Agua para Monterrey. Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México . [Libro en línea]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. <https://hdl.handle.net/11285/642843>
- Aguilar-Barajas, I., Sisto, N., Magaña-Rueda, V., Ramírez, A. I., & Mahlknecht, J. (2016). Drought policy in Mexico: a long, slow march toward an integrated and preventive management model. *Water Policy* 18(S2), 107-121. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.116>

- ANEAS. (2008). *El Agua Potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas*. 365 pp. Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento, A.C. <https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/libros/01-libro-el-agua-potable-en-mexico.pdf>
- ANEAS. (Junio de 2020). *Agua y Covid-19*. 68 pp. Agua y Saneamiento de la Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México, A.C. <https://www.aneas.com.mx/wp-content/uploads/2024/08/AyS-87.pdf>
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Perez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Water challenges in Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(2), 341-371. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>
- Arriaga-Medina, J. A., & Piedra-Miranda, A. G. (2021). Water consumption practices in university campuses. The experience of the NationalAutonomous University of Mexico. *Water Science & Technology*, 84(5), 1125-1135. doi:10.2166/wst.2021.306
- Barkin, D. (2005). The contradictions of urban water management in Mexico. *Vertigo (Hors-série 2)*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.1881>
- Barkin, D. (2012). The Governance Crisis in Urban Water Management in Mexico. In: Oswald Spring, Ú. (Eds.) *Water Resources in Mexico. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace*, vol 7. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05432-7_27
- Bravo-Cadena, J., Pavon, N. P., Balvanera, P., Sánchez-Rojas, G., & Razo-Zarate, R. (2021). Availability–Demand Balance under Climate Change Scenarios in an Overpopulated Region of Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (4), 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041846>
- Briseño, H., & Sánchez, A. (2018). Decentralization, consolidation, and crisis of urban water management in Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(4), 25-47. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-02>
- Camacho, H., & Casados, J. (2017). Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento en México. 194 pp. Repositorio IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/download/?key=221>
- Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. (D. O. (DOF), Ed.) Diario Oficial de la Federación (DOF). <https://www.gob.mx/indesol/documentos/constitucion-politica-de-los-estados-unidos-mexicanos-97187>
- Cervantes-Jiménez, M., Díaz-Delgado, C., González-Sosa, E., Ángel Gómez-Albores, M., & Mastachi-Loza, C. A. (2020). Proposal of a water management sustainability index for the 969 sub-basins of Mexico. *Journal of Maps*, 16(2), 432-444. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1763486>
- Chen, Y., & Bilton, A. M. (2022). Water Stress, Peri-Urbanization, and Community-Based Water Systems: A Reflective Commentary on the Metropolitan Area of Mexico City. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.790633>
- Chopra, A., & Ramachandran, P. (2021). Understanding water institutions and their impact on theperformance of the water sector in India. *Water Policy*, 23(2), 466-486. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.207>

- CONAGUA. (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. *Comisión Nacional del Agua*. 276 pp. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA. (2022). Estadísticas del Agua en México 2021. *Comisión Nacional del Agua*. 360 pp. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- CONAGUA. (2024). Estadísticas del Agua en México 2023. *Comisión Nacional del Agua*. 312 pp. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- CONAGUA, OECD, and IMTA. (2010). Financing water resources management in Mexico. <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/OECD.pdf>
- Cotler, H., Cuevas, M. L., Landa, R., & Frausto, J. M. (2022). Environmental Governance in Urban Watersheds: The Role of Civil Society Organizations in Mexico. *Sustainability*, 14(2), 988. <https://doi.org/10.3390/su14020988>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2003). Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. *NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003*. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5105753
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2022). Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2022). Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Fernández, D., Montañez, A. & Sarmento, N. (2023). Diagnóstico de la prestación de servicios de agua potable y saneamiento en México. *Documentos de proyectos (LC/TS.2023/80)*, Santiago. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/diagnostico_de_la_prestacion_de_los_servicios_de_agua_potable_y_alcantarillado_en_mexico.pdf
- García Amaro, E. (2004). Modifications to the system of climate classification of Köppen (5th ed.). UNAM: *Serie Libros*. 97 pp. Instituto de Geografía UNAM. <https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- González-Villarreal, F. J., & Arriaga-Medina, J. A. (2014). Crisis de los sistemas de agua potable en México. *H2O Gestión del Agua*, 1(3), 4-10. https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/novedades/H2O_Crisis_sistemasdeaguapotable.pdf
- H. Congreso del Estado. (2023). Ley del Agua del Estado de Chihuahua. Última reforma publicada en el periódico oficial: 12 de julio de 2023. Secretaría de Asuntos Legislativos y Jurídicos. Biblioteca Legislativa "Carlos Montemayor Aceves". Suprema Corte de Justicia de la Nación. [https://legislacion.scjn.gob.mx/buscador/paginas/wfArticuladoFast.aspx?q=hTF27+Bm22HmIOkLTZzDmyvLitxMBqRspYvO2BSgaXJ5jG0o3exHLixWck/yhC4hZbu92sHh7DFrX+Yh/dAOww=](https://legislacion.scjn.gob.mx/buscador/paginas/wfArticuladoFast.aspx?q=hTF27+Bm22HmIOkLTZzDmyvLitxMBqRspYvO2BSgaXJ5jG0o3exHLixWck/yhC4hZbu92sHh7DFrX+Yh/dAOww==)
=

- Hernández-Cruz, A., Sandoval-Solís, S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2022). An overview of modeling efforts of water resources in Mexico: Challenges and opportunities. *Environmental Science and Policy*, 136, 510-519. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.07.005>
- IMCO. (2023). El costo del agua en México: Un análisis de tarifas y de sus impactos para la sociedad. Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2023/08/Investigacion_Costo-real-del-agua-en-Mexico_31082023-1.pdf
- IMCO. (2023). Diagnóstico IMCO. Situación del agua en México. IMCO Centro de investigación en política pública. https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/?utm_source
- IMTA & SEMARNAT. (2018). Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento. Segunda etapa: diseñar y crear un nuevo modelo de gestión, acorde al sistema regulatorio. Proyecto HC-1818.1. 144 pp. Coordinación de Hidráulica. Subcoordinación de Hidráulica Urbana. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2071/HC-1818.1.pdf?sequence=1>
- Janjua, S., Hassan, I., Muhammad, S., Ahmed, S., & Ahmed, A. (2021). Water management in Pakistan's Indus Basin: challenges and opportunities. *Water Policy*, 23(6), 1329–1343. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.068>
- Magaña, V. (2016). Considerations for a Research Program on Drought in Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 115-133. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1274>
- Magaña, V., Ábrego Góngora, C. J., & Méndez Antonio, B. (2024). The Changing Climate and Domestic Water Consumption in Mexican Cities. *Investigaciones geográficas*, 114. <https://doi.org/10.14350/rig.60850>
- Martinez, S., Kralisch, S., Escolero, O., & Perevochtchikova, M. (2015). Vulnerability of Mexico City's water supply sources in the context of climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 6(3), 518-533. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.083>
- Medina-Rivas, C. M., Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J. A., & Revollo-Fernández, D. A. (2022). Spatial inequality of domestic water consumption in Mexico city. *Water Resources and Economics*, 40, 100210. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2022.100210>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The Green, Blue and Grey Water Foot print of Crops and Derived Crop Products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mumbi, A. W., Li, F., Bavumiragira, J. P., & Fangninou, F. F. (2021). Forecasting water consumption on transboundary water resources for water resource management using the feed-forward neural network: a case study of the Nile River in Egypt and Kenya. *Marine and Freshwater Research*, 73(3), 292-306. <https://doi.org/10.1071/MF21118>
- Nava, L. (2006). Cuando la gestión del agua se vuelve problemática: el caso de México. *La Chronique des Amériques*, 38. https://www.orison.uqam.ca/IMG/pdf/chro_nava_06_38.pdf
- Pfaff, A., Rodriguez, L. A., & Shapiro-Garza, E. (2019). Collective Local Payments for ecosystem services: New local PES between groups, sanctions, and prior watershed trust in Mexico. *Water Resources and Economics*, 28, 100136. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2019.01.002>
- Rosas Huerta, A., & Günther, M. G. (2020). Un acercamiento institucional a la gestión del agua ante el cambio climático en la Ciudad de México. *Argumentos. Estudios Críticos De La Sociedad*, 92, 55-77. <https://doi.org/10.24275/uamxoc-dcsh/argumentos/202092-03>

- Salazar-Adamas, A. (2021). The efficiency of post-reform water utilities in Mexico. *Utilities Policy*, 68, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101153>
- Saleth, R. M. (2014). 11 Water Governance. Institutional response as an adaptation to water scarcity. In A. Garrido & M. Shechter (Eds.), *Water for the Americas: Challenges and Opportunities*. Pp. 233-252. Routledge. https://www.researchgate.net/publication/281585145_Institutional_Response_as_An_Adaptation_to_Water_Scarcity
- Sánchez, D. H, Navarro-Gómez, C. J., Rentería, M., & Sánchez-Navarro, J. R. (2022). Saving water by returning to a constant water supply in Chihuahua. *Water International*, 48(1), 87-97. <https://doi.org/10.1080/02508060.2022.2122262>
- Sánchez-Cohen, I., Pedroza, A., Aguilar, S., Macias-Corral, M. A., & Velasquez, M. (2018). Computer aid for roof water harvesting systems analysis in rural areas of Mexico. *Water Practice & Technology*, 13(4), 847-858. <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.094>
- Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2017). Urban water supply in Mexico (Primera ed.). 64 pp. Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L. <http://dx.doi.org/10.17993/EcoOrgyCso.2017.29>. https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Alejandro-Silva-Rodriguez-De-San-Miguel/publication/321158580_Urban_water_supply_in_Mexico/links/5a11ceb9a6fdccc2d79b64bf/Urban-water-supply-in-Mexico.pdf
- Silva Rodríguez de San Miguel, J. A, Trujillo Flores, M. M., & Lambarry-Vilchis, F. (2018). Drinking water management description in Mexico. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 29(5), 922-937. <https://doi.org/10.1108/MEQ-04-2017-0038>
- Tortajada, C. (2006). Water Management in Mexico City Metropolitan Area. *International Journal of Water Resources Development*, 22(2), 353-376. <https://doi.org/10.1080/07900620600671367>
- World Bank Group. (2023). Data World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator>
- Yu Wang, R., van Rijswijk, M., & Dai, L. (2022). Improving connectivity in water governance: the implementation of water cooperation mechanisms in disparate political and social contexts. *International Journal of Water Resources Development*, 38(4), 545-553. <https://doi.org/10.1080/07900627.2022.2071848>
- Zamora Sáenz, I. & Sánchez Gálvez, D., 2020. Panorama y perspectivas del agua en México, 2019-2024. *Cuaderno de investigación No. 62. Jornada de agua, mares y océanos*. 197 pp. Instituto Belisario Domínguez. Senado de la República. http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/4803/CI_62.pdf?sequence=1&isAllowed=y

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Evaluación de la actividad antitopoisomerasa de extractos acuosos de semilla de *Pithecellobium dulce* obtenidos mediante extracción asistida por ultrasonido

Evaluation of the antitopoisomerase activity of aqueous seed extracts of sweet *Pithecellobium* obtained by ultrasound-assisted extraction

Gladys América Prado-Guzmán¹, Herenia Adilene Miramontes-Escobar², Víctor Manuel Zamora-Gasga¹, Alejandro Pérez-Larios², Jorge Alberto Sánchez-Burgos^{1*}

¹ Instituto Tecnológico de Tepic, Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, División de Estudios de Posgrado, Av. Instituto Tecnológico No 2595, Col Lagos del Country C.P. 63175, Tepic, Nayarit Mexico.

² Nanocatalysis Research Laboratory, Department of Engineering, Centro Universitario de los Altos, University of Guadalajara, Tapatitlán de Morelos, Mexico.

*Correspondencia: Correo electrónico: jsanchezb@ittec.edu.mx (Jorge Alberto Sánchez-Burgos)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.2087>

Recibido: 19 de septiembre de 2025; Aceptado: 19 de noviembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. José Rafael Minjares-Fuentes

Resumen

En este estudio se optimizó la extracción asistida por ultrasonido (EAU) en semillas de *Pithecellobium dulce*, evaluando el efecto de tiempo (5–15 min), amplitud (50–100 %) y ciclo de pulso (0.25–1 s) mediante un diseño factorial fraccionado 3^{3-1} y análisis de superficie de respuesta. Las variables de respuesta fueron fenoles solubles totales (FST) y capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP). Las condiciones óptimas (10 min, 100 % amplitud, 0.625 s ciclo) generaron un extracto con alto contenido fenólico y la mayor capacidad antioxidante. Este extracto optimizado fue evaluado en un modelo de *Saccharomyces cerevisiae* genéticamente modificado para determinar su actividad antitopoisomerasa. Los resultados mostraron una inhibición global del 51 % y un efecto específico del 21 % sobre la topoisomerasa tipo II, sin presentar citotoxicidad en cepas con mecanismos de reparación intactos. Estos hallazgos constituyen la primera evidencia de actividad antitopoisomerasa en semillas de *P. dulce* y sugieren que este subproducto representa una fuente prometedora de compuestos bioactivos

con potencial aplicación en las industrias nutraceutica y farmaceutica, además de contribuir a la valorización de residuos agroindustriales mediante procesos sostenibles.

Palabras clave: *Pithecellobium*, gestión de residuos, ultrasonido, antioxidante, antitopoisomerasa.

Abstract

This study optimized ultrasound-assisted extraction (UAE) from *Pithecellobium dulce* seeds by evaluating the effect of sonication time (5–15 min), amplitude (50–100 %), and pulse cycle (0.25–1 s) using a 3^{3-1} fractional factorial design coupled with response surface analysis. Response variables included total soluble phenolics (TSP) and antioxidant capacity (ABTS, DPPH, and FRAP). Optimal conditions (10 min, 100 % amplitude, 0.625 s cycle) yielded an extract with high phenolic content and the greatest antioxidant activity. The optimized extract was further tested in a genetically modified *Saccharomyces cerevisiae* model to assess antitopoisomerase activity. Results showed an overall inhibition of 51 % and a specific effect of 21 % against type II topoisomerase, without cytotoxicity in strains with intact DNA repair mechanisms. These findings provide the first evidence of antitopoisomerase activity in *P. dulce* seeds and suggest that this underutilized byproduct represents a promising source of bioactive compounds. Its potential applications in nutraceutical and pharmaceutical industries, combined with its role in agro-industrial waste valorization through sustainable processes, highlight the relevance of UAE as an efficient tool for obtaining functional extracts.

Keywords: *Pithecellobium*, waste management, ultrasound, antioxidant, antitopoisomerase.

1. Introducción

En las últimas décadas, el estudio de compuestos bioactivos (CB) presentes en matrices vegetales ha cobrado gran relevancia debido a su capacidad para modular procesos fisiológicos y prevenir diversas enfermedades crónicas no transmisibles como la diabetes, enfermedades cardiovasculares, cáncer, y procesos neurodegenerativos (Barba et al., 2016). Estos compuestos –polifenoles, flavonoides, alcaloides y terpenoides, entre otros– se encuentran tanto en partes comestibles como en subproductos agroindustriales, tales como cáscaras, semillas y bagazos, los cuales representan una fuente rica y poco explorada de CB (Szabo et al., 2022; Hernández-Montesinos et al., 2024). Su aprovechamiento contribuye no solo al desarrollo de ingredientes funcionales, sino también a la valorización de residuos, bajo los principios de economía circular y sustentabilidad.

En este contexto, *Pithecellobium dulce* (Guamúchil), una leguminosa ampliamente distribuida en regiones tropicales y subtropicales, ha sido objeto de interés debido a su perfil fitoquímico. Aunque el consumo tradicional se centra en la pulpa, diversos estudios han reportado que hojas, corteza y semillas poseen propiedades medicinales y farmacológicas con actividades antibacteriana, antifúngica, antiinflamatoria, hepatoprotectora y antidiabética (Kulkarni et al., 2018; Kumar et al., 2022; Hameed et al., 2024). Además, en la medicina tradicional se utiliza para tratar afecciones gastrointestinales, fiebre y enfermedades cutáneas (Sneha et al., 2020). Particularmente, las semillas de guamúchil han mostrado efectos antioxidantes, antihiper glucémicos y antihiperlipidémicos en modelos animales, lo que sugiere un potencial para el desarrollo de productos nutraceuticos y

farmacológicos (Nagmoti et al., 2015). Sin embargo, la mayoría de los estudios emplean métodos de extracción convencionales que requieren solventes orgánicos, altas temperaturas y tiempos prolongados, lo cual puede comprometer la estabilidad y actividad de los CB. En este sentido, las tecnologías emergentes como la extracción asistida por ultrasonido (EAU), han demostrado ser alternativas viables y sostenibles para la obtención de compuestos bioactivos de matrices vegetales. Esta técnica basada en la cavitación acústica promueve la disrupción celular y la liberación eficiente de metabolitos, reduciendo tiempo, energía y solventes, y preservando compuestos termolábiles (Borthwick et al., 2005; Zhou et al., 2012).

Más allá de la actividad antioxidante e inflamatoria, existe interés creciente por explorar mecanismos biológicos adicionales de los compuestos vegetales. Una de estas rutas es la inhibición de topoisomerasas, enzimas clave involucradas en la replicación y transcripción del ADN. La inhibición de estas enzimas, particularmente las topoisomerasas I y II, ha sido identificada como una estrategia importante en el desarrollo de agentes antitumorales (Momin y Nair, 2002; Zeng et al., 2024). La evaluación de la actividad antitopoisomerasa de extractos vegetales representa así, una vía prometedora para la identificación de nuevos candidatos bioactivos con potencial aplicación farmacológica.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue optimizar las condiciones de extracción asistida por ultrasonido de semillas de *P. dulce* y evaluar su capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP), así como su posible actividad antitopoisomerasa, a fin de determinar su potencial uso como fuente de compuestos funcionales aplicables en las industrias alimentaria, nutracéutica y farmacéutica.

2. Materiales y métodos

2.1 Preparación de la muestra

Se utilizaron semillas de frutos de *Pithecellobium dulce* en madurez de consumo, adquiridos en un mercado local de la ciudad de Tepic, Nayarit, México. Las semillas fueron separadas manualmente del fruto y se secaron a temperatura ambiente (25 °C) durante 5 días bajo sombra, la humedad inicial fue del 37 % y dejó secar hasta alcanzar una humedad del 4.55 %. Una vez secas, las semillas se molieron (IKA modelo MF-20, Alemania) hasta llegar a un tamaño de partícula de 600 micras y fueron almacenadas en bolsas de cierre hermético a 25 °C para su posterior análisis.

2.2 Diseño experimental para la extracción de compuestos bioactivos

Para optimizar las condiciones de extracción asistida por ultrasonido (EAU), se aplicó un diseño factorial fraccionado 3^{3-1} , considerando como factores: tiempo (5, 10, 15 min), amplitud (50, 75, 100 %) y ciclo (0.25, 0.5, 1 s). Se obtuvieron nueve tratamientos por triplicado. Las variables de respuesta fueron FST y CAO (ABTS, DPPH, FRAP).

Tabla 1. Diseño experimental fraccionado 3^{3-1} de muestras con extracción asistida por ultrasonido.

Table 1. Fractional 3^{3-1} experimental design of samples with ultrasound-assisted extraction.

Tratamiento (T)	Tiempo (min)	Amplitud (%)	Ciclo (s)
T1	10	100	0.25
T2	5	100	0.5
T3	15	50	0.5
T4	10	50	1
T5	5	50	0.25
T6	15	75	0.25
T7	15	100	1
T8	10	75	0.5
T9	5	75	1

2.3 Extracción de compuestos bioactivos

Se realizó una extracción acuosa (relación 1:10, p/v) en tubos de polipropileno de 50 mL. Tras agitación magnética por 5 min, las muestras se sometieron a ultrasonido en un equipo UP400S (Hielscher Ultrasonics GmbH, Alemania; 400 W, 24 kHz) con sonotrodo de acero inoxidable modelo H22L2D. La temperatura se controló a 20 ± 3 °C mediante baño de recirculación (Martínez-Olivo et al., 2023). Se evaluó como semilla control (SC) una muestra sin tratamiento ultrasónico la cual fue sometida a agitación magnética durante 5 min.

Los extractos fueron centrifugados a 6000 rpm por 10 min a 4 °C, y el sobrenadante se recuperó. Los residuos sólidos se lavaron dos veces y se centrifugaron nuevamente. Los extractos combinados se congelaron a -80 °C, liofilizaron (Labconco FreeZone 6, Kansas City, MO, USA) y almacenaron a temperatura ambiente hasta su análisis.

2.4 Análisis proximal y características fisicoquímicas de semillas de *Pithecellobium dulce* Neutralización del radical ABTS^{•+}

El contenido de humedad (934.06), cenizas (940.26), lípidos (950.54) y proteínas (984.13) se determinó siguiendo métodos de la AOAC (2005). Los carbohidratos solubles se cuantificaron mediante el método fenol-sulfúrico (Dubois et al., 1956). La lectura de absorbancia se realizó a 480 nm en un espectrofotómetro UV-Vis, utilizando una curva estándar de glucosa (10–100 mg/mL).

La fibra dietética total (FDT), soluble (FDS) e insoluble (FDI) se determinó mediante el método enzimático-gravimétrico de la AOAC (2005, 991.42), modificado por Saura-Calixto et al. (2000). Tras la digestión enzimática con pepsina (pH 1.58) y α -amilasa (pH 6.9), las muestras fueron

centrifugadas. El residuo seco correspondió a la FDI. El sobrenadante se sometió a diálisis y posterior hidrólisis ácida; la FDS se cuantificó con ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) como reactivo colorimétrico, leyendo la absorbancia a 530 nm. La FDT se calculó con la ecuación:

$$FDT = FDS + FDI \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde, FDT es la Fibra dietética total, FDS es Fibra dietética soluble y FDI es Fibra dietética insoluble. Los resultados fueron expresados como g de glucosa/100 g de base seca.

2.5 Contenido de fenoles solubles totales (FST)

El contenido de fenoles solubles totales (FST) se determinó mediante el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, el cual se basa en la reducción del reactivo fosfomolibdato-fosfotungstato por compuestos fenólicos, generando una coloración azul proporcional a su concentración. Se siguió la metodología propuesta por Montreau (1972) con algunas modificaciones (Alvarez-Parrilla et al., 2011), empleando el reactivo de Folin-Ciocalteu. La absorbancia se midió a 750 nm en un lector de microplaca (Biotek, Synergy HT, Winooski VT, USA), utilizando el programa Gen5. Los resultados fueron expresados en equivalentes de ácido gálico por g de extracto en base seca (mg EAG/g bs), usando una curva estándar de ácido gálico (0–0.2 mg/mL).

2.6 Determinación de capacidad antioxidante (CAOX)

Los ensayos ABTS, DPPH y FRAP se emplearon de manera complementaria para evaluar la capacidad antioxidante de los extractos. Mientras que ABTS y DPPH se basan en la neutralización de radicales libres mediante transferencia de hidrógeno y de electrones, respectivamente, el ensayo FRAP determina la capacidad reductora del hierro ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$), reflejando el potencial reductor global del sistema. La inclusión de los tres métodos permite obtener una visión más completa de los diferentes mecanismos de acción antioxidante presentes en los extractos.

Neutralización del radical ABTS^{•+}

La actividad antirradical se determinó utilizando la metodología descrita por (Re et al., 1999), con algunas modificaciones. Se preparó una solución del radical ABTS^{•+} y se diluyó con tampón fosfato hasta alcanzar una absorbancia de 0.70 ± 0.01 a 734 nm, medida en un lector de microplacas (Biotek, Synergy HT, Winooski VT, USA). Posteriormente, se mezclaron 20 μL del extracto (disuelto en metanol/agua acidificada, 1 mg/mL) con 255 μL de la solución de ABTS^{•+}, incubándose a 30 °C durante 7 min. La disminución de la absorbancia se comparó con una curva estándar de Trolox (37.5–600 μM), y los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox (mmol ET/g de extracto en base seca).

Método del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH)

Se siguió el método de Prior et al. (2005) con algunas modificaciones. Se preparó una solución madre disolviendo 49.29 mg de DPPH en 25 mL de metanol, la cual fue almacenada a -20°C hasta su uso. La solución de trabajo se preparó a una concentración final de $190\text{ }\mu\text{M}$ en metanol. En un lector de microplacas de detección múltiple (Biotek, Synergy HT, Winooski VT, USA), se mezclaron $20\text{ }\mu\text{L}$ de muestra (en solución metanol/agua acidificada, 1 mg/mL) con $200\text{ }\mu\text{L}$ de la solución de DPPH, y la reacción se incubó durante 10 min antes de medir la absorbancia a 517 nm utilizando el software Gen5. Se utilizó una curva estándar de Trolox (37.5 a $600\text{ }\mu\text{M}$), y los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox (mmol ET/g de extracto base seca).

Capacidad de Reducción de Hierro Férrico en Plasma (FRAP)

Para la determinación de actividad reductora, se siguió el método propuesto por Alvarez-Parrilla et al. (2011). La solución reactiva se preparó mezclando 25 mL de tampón de acetato (0.4 M , pH 3.6), 2.5 mL de una solución de TPTZ (10 mM en $\text{HCl } 40\text{ mM}$) y 2.5 mL de una solución de $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (20 mM). La mezcla se incubó a 37°C y se colocaron $24\text{ }\mu\text{L}$ del extracto (disuelto en metanol/agua acidificada, 1 mg/mL) y $180\text{ }\mu\text{L}$ del reactivo FRAP en cada pocillo de una microplaca. Después de 30 min de incubación a temperatura constante, se midió la absorbancia a 595 nm en un lector de microplacas (Biotek, Synergy HT, Winooski VT, USA), utilizando el software Gen5. La actividad reductora se determinó mediante una curva estándar de Trolox ($8.125\text{ }\mu\text{M}$ – $130\text{ }\mu\text{M}$), y los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox (mmol ET/g de extracto en base seca).

2.7 Ensayo antitopoisomerasa

El ensayo se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita por Jensen et al. (2000), con algunas modificaciones. Se utilizó *Saccharomyces cerevisiae* como modelo para evaluar la inhibición de la proliferación celular inducida por topoisomerasa I. Las cepas genéticamente modificadas JN394, JN394t-1 y JN362a fueron reactivadas en medio líquido YPD (extracto de levadura, peptona y dextrosa) e incubadas en un agitador orbital a 30°C y 50 rpm durante 12 h. Posteriormente, se realizó el conteo de células viables mediante cámara de Neubauer y se ajustó la concentración a 2×10^6 células/mL.

Para los tratamientos, se colocaron 3 mL del cultivo celular (conteniendo 6×10^6 células) en tubos de ensayo, y se añadieron $50\text{ }\mu\text{L}$ de cada uno de los siguientes tratamientos: (i) extracto optimizado disuelto en dimetilsulfóxido (DMSO), (ii) control positivo (camptotecina, inhibidor específico de topoisomerasa I), y (iii) control negativo (DMSO únicamente, como disolvente). Las mezclas se incubaron en un agitador orbital a 30°C y 150 rpm durante 24 h. Transcurrido el tiempo de incubación, se realizaron diluciones seriadas de cada tratamiento y se inocularon $100\text{ }\mu\text{L}$ sobre cajas de Petri con medio sólido YPDA. Tras la incubación, se cuantificó el crecimiento celular, y los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición, considerando el crecimiento en el control negativo como el 100 %.

2.8 Análisis estadístico

Los datos obtenidos a partir de un diseño factorial fraccionado 3^{3-1} , que consistió en 9 tratamientos y consideró como variables independientes el tiempo, la amplitud y el ciclo de extracción, fueron analizados mediante el software STATISTICA, versión 10 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EE. UU.). Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, y los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar ($n=3$) para cada tratamiento. Las diferencias significativas entre tratamientos fueron evaluadas mediante análisis de varianza de dos vías (ANOVA), seguido de una prueba post hoc LSD de Fisher, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Con base en los datos experimentales, se llevó a cabo un análisis de superficie de respuesta (ASR) para determinar las condiciones óptimas de extracción en función de cada variable de respuesta. La variable empleada para optimizar el proceso fue aquella que mostró el mejor ajuste estadístico ($R^2 > 0.95$) en el modelo de superficie, evaluando además la significancia del modelo global con un valor de $\alpha = 0.05$.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de extractos acuosos de semillas sin tratamiento por EAU

Análisis proximal

Los resultados del análisis proximal indicaron que los carbohidratos y los lípidos constituyen los principales componentes de las semillas de *Pithecellobium dulce* (Tabla 2). El contenido lipídico obtenido fue superior al reportado en otras leguminosas comestibles, como frijol negro (1.50 %), garbanzo (5.18 %) y lenteja (0.98 %) (Silva-Cristobal et al., 2010). Este hallazgo sugiere que las semillas de *P. dulce* podrían considerarse una fuente relevante de compuestos lipofílicos —por ejemplo, ácidos grasos insaturados (oleico y linoleico) y triterpenoides como oleanólico—, los cuales poseen reconocidos efectos nutracéuticos tales como actividad antioxidante, hipocolesterolémica y antiinflamatoria (Monroy et al., 2004; Aldarhami et al., 2023).

En relación con la fibra dietética total (15 %), se observó una predominancia de la fracción insoluble (12.01 ± 0.44 %). Aunque la información específica sobre el contenido de FDI y FDS en semillas de *P. dulce* es escasa, se ha reportado de manera general que la especie presenta fibra dietética total del 7 % (Dhanisha et al. 2021). Resultados en harina de fruto muestran igualmente una mayor proporción de fibra insoluble respecto a la soluble (Kavita et al., 2023). Este comportamiento coincide con lo descrito en otras semillas, como *Salvia hispanica* L., donde la fracción insoluble constituye la mayor parte de la fibra dietética total (Muñoz et al., 2013). En conjunto, el alto contenido de FDI en las semillas de *P. dulce* sugiere que una fracción importante de sus componentes estructurales podría resistir la digestión en el tracto gastrointestinal superior y alcanzar el colon, donde serían fermentados por la microbiota intestinal, reforzando su potencial funcional.

Tabla 2. Composición proximal de semillas de *P. dulce*.**Table 2.** Proximate composition of *P. dulce* seeds.

Parámetro	Contenido (%)
Humedad	4.55 ± 1.02
Cenizas	3.35 ± 0.06
Carbohidratos solubles	10.57 ± 0.69
Lípidos	10.16 ± 0.04
Proteína	55.91 ± 2.68
FDS	3.45 ± 0.29
FDI	12.01 ± 0.44
FDT	15.46 ± 0.15

*Media ± desviación estándar, n=3. Los resultados se expresan en base a peso seco. FDS: fibra dietética soluble, FDI: fibra dietética insoluble, FDT: fibra dietética total.

3.2 Semillas de *Pithecellobium* tratadas mediante EAU

Extracción de CB, determinación de FST, ABTS, DPPH y FRAP

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que la extracción asistida por ultrasonido tuvo un efecto significativo en la liberación de compuestos fenólicos y en la mejora de la capacidad antioxidante de las semillas de *P. dulce* (Tabla 3). En comparación con la semilla control (SC) (muestra sin tratamiento ultrasónico), los tratamientos con ultrasonido (T1–T9) mostraron incrementos notables en todos los métodos de evaluación antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP), así como en el contenido de compuestos fenólicos, lo cual concuerda con estudios previos que han reportado la eficiencia del ultrasonido como una técnica de intensificación en la extracción de metabolitos bioactivos de matrices vegetales (Teixeira, 2023; Özdemir et al., 2025).

La semilla de guamúchil control (SC) presentó la menor concentración de fenoles solubles totales ($3 \times 10^{-3} \pm 8 \times 10^{-4}$ mg EAG/g) en comparación a los tratamientos con extracción asistida por ultrasonido, con mayor actividad antioxidante en el ensayo ABTS (47.53 ± 3.95 mmol ET/g), el cual denota la capacidad de los compuestos para inhibir la formación de radicales libres. Por otra parte, se presentan en menor predominancia los compuestos con actividad reductora (FRAP) (3.7 ± 0.93 mmol ET/g) seguido de aquellos con actividad de inhibición de radicales libres ya formados (DPPH) (2.29 ± 2.62 mmol ET/g).

Los resultados del método ABTS evidenciaron un incremento significativo ($p < 0.05$) en la capacidad antioxidante de todos los tratamientos con ultrasonido en comparación con la semilla control (47.53 ± 3.95 mmol ET/g). El tratamiento T2, con un tiempo de exposición de 5 min, presentó la mayor capacidad antioxidante (6572.84 ± 35.05 mmol ET/g), seguido de T5 (6057.81 ± 36.21 mmol ET/g) y T1 (3614.06 ± 371.57 mmol ET/g), lo que representa un aumento de hasta 138 veces respecto al control.

En contraste, el tratamiento T6, con un tiempo de exposición de 15 min, mostró el valor más bajo entre los tratamientos con ultrasonido (1070.96 mmol ET/g), aunque aun significativamente superior al control. Estos resultados sugieren que tiempos de exposición prolongados pueden reducir la efectividad de los compuestos bioactivos en su capacidad para neutralizar el radical ABTS. La alta capacidad antioxidante observada bajo tiempos cortos y amplitudes moderadas sugiere que las condiciones aplicadas fueron efectivas para inducir cavitación acústica, promoviendo la ruptura de estructuras celulares y facilitando la liberación de antioxidantes hidrosolubles (Contreras-López et al., 2020; Zhong et al., 2022).

En el ensayo DPPH, todos los tratamientos con ultrasonido mostraron una mejora significativa en la capacidad secuestradora de radicales libres respecto al control. El tratamiento T7, con las condiciones más intensas de extracción (15 min, 100 % de amplitud, ciclo de 1 s), presentó la mayor actividad (341.53 ± 8.42 mmol ET/g). Aunque no se observaron diferencias estadísticas entre el resto de los tratamientos (T1–T6, T8, T9), todos alcanzaron valores al menos 112 veces superiores al control (2.29 ± 2.62 mmol ET/g), lo que evidencia la efectividad general del ultrasonido en la liberación de compuestos con capacidad antioxidante tipo donador de hidrógeno (Okeke et al., 2025; Pereira et al., 2025).

La capacidad antioxidante medida mediante el método FRAP también se vio favorecida por la aplicación del ultrasonido. El tratamiento que mostró mayor actividad reductora fue (20.23 ± 0.35 mmol ET/g) en condiciones de extracción de 5 min, 71 % y 1 s, mientras que el tratamiento de menor actividad fue T3 (2.64 mmol ET/g) bajo condiciones de 15 min, 50 % y 0.5 s. En todos los casos, los valores fueron significativamente superiores al control (3.70 ± 0.93 mmol ET/g). De acuerdo con lo observado, el tratamiento que presentó mayor capacidad antioxidante requirió tiempos de ultrasonido más cortos (5 min) que aquel que mostró valores inferiores con tiempos más largos (15 min). Por ello, al igual que en el ensayo de ABTS, el tiempo de exposición es el factor que ejerce un mayor efecto sobre la capacidad antioxidante de los compuestos liberados, lo cual fue corroborado con un análisis de varianza de 2 vías ($p < 0.05$). Así mismo, se observó estadísticamente que la interacción de los factores tiempo-amplitud ejerce un mayor efecto significativo (promueven una mayor liberación) sobre la capacidad antioxidante. Con tiempos inferiores a 10 min y amplitudes no mayores al 50 % es posible obtener compuestos que preserven su capacidad reductora y su capacidad de inhibir la formación de radicales libres (Chemat et al., 2017).

Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de fenoles solubles totales (FST) entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T1 (10 min, 100 % de amplitud, 0.25 s de ciclo) presentó el mayor contenido fenólico (18.79 mg EAG/g), mientras que el menor valor se registró en T5 (5 min, 50 %, 0.25 s), con 9.38 mg EAG/g. El análisis de varianza bifactorial indicó que el tiempo de exposición y la amplitud son los principales factores que influyen en la eficiencia de extracción, observándose una mayor liberación de compuestos fenólicos a mayor tiempo y amplitud de ultrasonido. Por otro lado, los tratamientos T4 (10 min, 50 %, 1 s) y T5 (5 min, 50 %, 0.25 s) mostraron valores similares, lo que sugiere que el uso de ciclos largos (1 s) puede afectar negativamente la extracción, probablemente debido a una menor cavitación efectiva. Estos resultados coinciden con lo reportado por Da Porto et al. (2015), quienes observaron una mayor extracción de compuestos fenólicos a partir de semillas de uva sometidas a extracción asistida por ultrasonido (EAU) con tiempos prolongados (≥ 15 min) y alta potencia (150 W). No obstante, se ha señalado que condiciones intensas también pueden inducir la degradación de algunos compuestos bioactivos

(Kidak y Ince, 2006), lo que podría explicar la menor actividad antioxidante observada en ciertos tratamientos, a pesar del alto contenido fenólico.

Tabla 3. Capacidad antioxidante y contenido de fenoles solubles totales (FST) de los extractos sometidos a las diversas condiciones de asistencia ultrasónica.

Table 3. Antioxidant capacity and total soluble phenolic content (FST) of the extracts subjected to the different ultrasound-assisted conditions.

TRATAMIENTO	ABTS mmol ET/g	DPPH mmol ET/g	FRAP mmol ET/g	FST mg EAG/g
SC*	47.53 ± 3.95 ^a	2.29 ± 2.62 ^a	3.70 ± 0.93 ^a	0.003 ± 0.01 ^a
T1	3614.06 ± 371.57 ^e	270.74 ± 8.50 ^b	7.49 ± 0.59 ^c	18.79 ± 0.21 ^h
T2	6572.84 ± 35.05 ^h	286.35 ± 0.41 ^b	12.75 ± 1.72 ^d	14.29 ± 0.03 ^c
T3	3145.32 ± 31.75 ^{ce}	282.38 ± 1.46 ^b	2.64 ± 0.74 ^a	16.27 ± 0.03 ^g
T4	3245.01 ± 4.11 ^{de}	302.05 ± 9.12 ^b	12.66 ± 3.77 ^d	9.70 ± 0.31 ^b
T5	6057.81 ± 36.21 ^g	271.91 ± 4.19 ^b	4.59 ± 1.13 ^{bc}	9.38 ± 0.20 ^b
T6	1070.96 ± 62.75 ^f	295.66 ± 8.17 ^b	5.93 ± 0.09 ^{bc}	13.69 ± 0.39 ^c
T7	2784.47 ± 289.38 ^{bc}	341.53 ± 3.82 ^c	4.89 ± 1.21 ^{bc}	10.58 ± 0.79 ^d
T8	2767.91 ± 98.45 ^b	257.24 ± 0.83 ^b	15.15 ± 1.27 ^d	11.73 ± 0.21 ^e
T9	2673.84 ± 57.06 ^b	276.00 ± 2.47 ^b	20.23 ± 0.35 ^e	12.65 ± 0.01 ^f

*SC: Semilla control. Los valores fueron expresados como la media ± desviación estándar (n=3). Letras diferentes entre columnas muestran diferencia significativa entre los tratamientos por cada variable analizada ($p < 0.05$). Las diferencias significativas entre tratamientos se evaluaron mediante un ANOVA de dos vías, seguido de la prueba Fisher LSD ($\alpha=0.05$). Tratamientos (tiempo/amplitud/ciclo): T1) 10min/100 %/0.25s, T2) 5min/100 %/0.5s, T3) 15min/50 %/0.5s, T4) 10min/50 %/1s, T5) 5min/50 %/0.25s, T6) 15min/75 %/0.25s, T7) 15min/100 %/1s, T8) 10min/75 %/0.5s, T9) 5min/75 %/1s.

Los resultados muestran que la extracción asistida por ultrasonido mejora significativamente la liberación de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de los extractos acuosos de semillas de *P. dulce*. En particular, la capacidad reductora medida por FRAP, relacionada con la actividad reductora de hierro, ya que se ha asociado con la inhibición de enzimas como la topoisomerasa II, implicada en la replicación del ADN (Hevener et al., 2018). Por lo tanto, los extractos obtenidos bajo condiciones óptimas de sonicación no solo presentan propiedades antioxidantes destacadas, sino también un posible efecto inhibitor sobre topoisomerasa II, lo cual fue evaluado experimentalmente en este estudio.

3.3 Optimización mediante análisis de superficie de respuesta

Se aplicó el análisis de superficie de respuesta considerando efectos lineales, cuadráticos e interacciones a dos factores (tiempo, amplitud, ciclo). El análisis de varianza mostró efectos significativos ($p < 0.05$) de la interacción tiempo y amplitud sobre todas las variables de respuesta (DPPH, ABTS, FRAP y FST). Las condiciones óptimas de extracción se determinaron en 10 min, 100 % de amplitud y un ciclo de 0.625 s. Aunque estas condiciones favorecieron la optimización simultánea de todas las respuestas evaluadas, se seleccionó la variable FRAP como criterio principal de ajuste del modelo, debido a que presentó el menor error residual (2.514), ausencia de falta de ajuste significativa ($p > 0.05$) y un coeficiente de determinación ajustado (R^2) superior al 95 % (Tabla 4). Aunque el modelo generado para DPPH presentó un menor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.54$), este comportamiento podría atribuirse a la naturaleza del ensayo, que depende fuertemente de la cinética de reacción y de la estabilidad del radical DPPH frente a compuestos de diferente polaridad. Por tanto, en sistemas complejos como los extractos vegetales, esta variabilidad puede limitar el ajuste del modelo matemático, por lo que se priorizó el modelo FRAP, que mostró mayor consistencia estadística ($R^2 > 0.95$) y relevancia biológica.

El análisis de las superficies de respuesta indicó que, con el ciclo fijo en 0.625 s, amplitudes entre 75–100 % y tiempos cercanos a 10 min promovieron un incremento en la capacidad antioxidante en los tres métodos evaluados. Sin embargo, para ABTS y FRAP se observó una disminución de la respuesta antioxidante con tiempos prolongados a alta amplitud, mientras que el contenido fenólico total (FST) mostró una tendencia ascendente a mayores tiempos de exposición, lo que sugiere que la liberación de compuestos fenólicos requiere mayor intensidad y duración del tratamiento por ultrasonido.

Tabla 4. Ecuaciones de predicción de los distintos ensayos realizados y su ajuste.

Table 4. Prediction equations of the different assays performed and their fit.

Ensayo	Ecuación de predicción	R^2	Lack of fit	Condición óptima (tiempo/amplitud/ciclo)
ABTS	$-683.6279x + 20.3418x^2 - 492.2748y + 3.3051y^2 + 1984.0470$	0.9949	>0.05	10min/100 %/0.625
DPPH	$-317.0410x + 21.1172x^2 - 106.0659y + 0.84559y^2 - 285.4567$	0.5440	>0.05	10min/100 %/0.625
FRAP	$1.8019x - 0.1303x^2 + 1.5385y - 0.01003y^2 + 11.2843$	0.9607	>0.05	10min/100 %/0.625
FST	$0.6202x - 0.0239x^2 - 0.05936y + 0.0008y^2 + 1.2196$	0.9934	>0.05	10min/100 %/0.625

A partir de la ecuación generada por los modelos, se construyeron superficies de respuesta para cada variable dependiente (FST, DPPH, ABTS y FRAP), con el propósito de optimizar el proceso de extracción. Entre ellas, la superficie correspondiente al método FRAP (Fig. 1) fue seleccionada como modelo óptimo, ya que presentó un ajuste estadísticamente significativo ($R^2 > 95$) y un ajuste de modelo superior al 0.05 (Lack of fit). El interés en esta variable radica en que la capacidad antioxidante medida por FRAP, asociada a la actividad reductora y quelante de hierro, ha sido

vinculada con la inhibición de topoisomerasas, lo que constituye un objetivo central en esta investigación.

En la superficie de respuesta se observó que la capacidad reductora se incrementó con el aumento del tiempo y la amplitud del ultrasonido, alcanzando valores máximos alrededor de los 10 min y 100 % de amplitud. Este comportamiento indica un efecto positivo de ambos factores en la liberación de compuestos antioxidantes, producto de una cavitación más intensa que favorece la ruptura celular. Sin embargo, a tiempos más prolongados, el efecto cuadrático del tiempo genera una ligera disminución en la respuesta, posiblemente debido a la degradación mecánica u oxidativa de algunos compuestos fenólicos. Asimismo, la interacción entre tiempo y amplitud evidenció un efecto sinérgico, donde la combinación de tiempos moderados y alta amplitud promovió la máxima capacidad reductora observada.

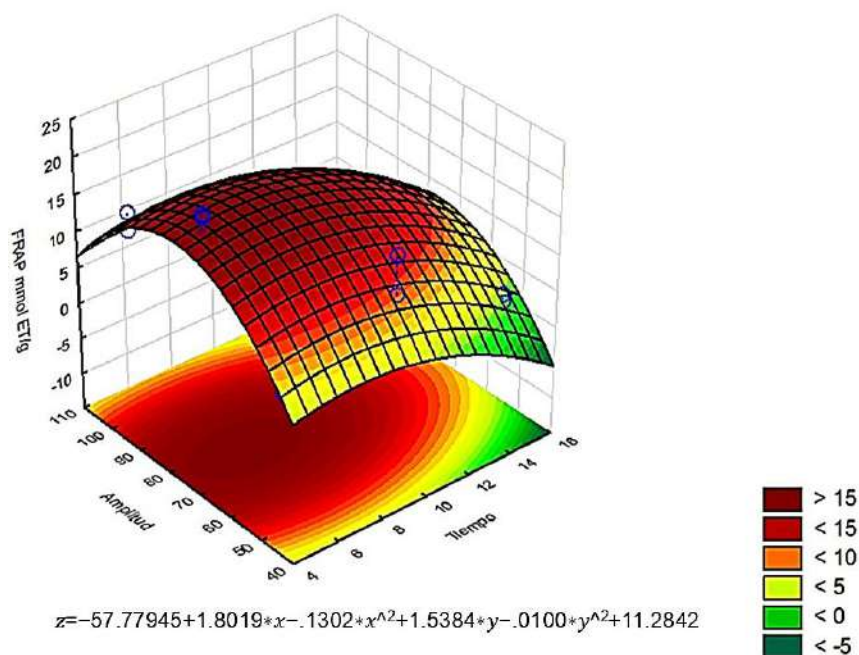


Figura 1. Superficie de respuesta para FRAP (10 min, 100% amplitud, 0.625 s ciclo).

Figure 1. Response surface for FRAP (10 min, 100% amplitude, 0.625 s cycle).

3.4 Ensayo antitopoisomerasa del extracto optimizado

El extracto obtenido bajo condiciones optimizadas fue evaluado con las cepas *Saccharomyces cerevisiae* JN394, JN362a y JN394t-1 (Fig. 2), con el objetivo de determinar su actividad inhibidora sobre enzimas topoisomerasa. Se observó inhibición del crecimiento celular en las cepas JN394 (51 %) y JN362a (21 %), lo que sugiere la presencia de compuestos con actividad antitopoisomerasa tipo II. La cepa JN362a presenta mecanismos de reparación del ADN altamente eficientes en comparación con las demás cepas utilizadas, lo que le permite mantener un desarrollo celular normal (Redon et

al., 2003). El extracto evaluado no mostró inhibición sobre esta cepa, lo cual es un resultado esperado y favorable, ya que indica que el extracto no ejerce efectos citotóxicos inespecíficos ni interfiere con células funcionalmente sanas. Por su parte, la cepa JN394 está genéticamente modificada para presentar una deficiencia en los mecanismos de reparación del ADN, lo que la hace especialmente sensible a compuestos que interfieren con la integridad genómica. El extracto optimizado mostró un 51 % de inhibición del crecimiento en esta cepa, valor que supera en 0.58 veces la inhibición observada con el control positivo (camptotecina), dado que el extracto optimizado se probó a una concentración de 1 mg/mL, esto equivale a una concentración de 65.5 $\mu\text{mol ET/g}$ de extracto utilizado. La inhibición significativa de JN394, junto con la ausencia de efecto sobre JN362a, que posee mecanismos de reparación eficientes, sugiere que el extracto actúa específicamente sobre enzimas topoisomerasas, y no por un efecto antimicrobiano inespecífico. En caso de que sí se hubiera observado inhibición en JN362a, la actividad se atribuiría más probablemente a un efecto citotóxico general o antimicrobiano (Khan et al., 2002). Para confirmar la especificidad del efecto sobre la topoisomerasa tipo II, se utilizó la cepa JN394t-1, la cual carece del gen *TopI* que codifica para la topoisomerasa tipo I, lo que permite atribuir cualquier inhibición observada a la acción sobre topoisomerasa tipo II. En esta cepa, el extracto mostró un 21 % de inhibición, 0.28 veces mayor que el control positivo, lo que respalda la hipótesis de que la actividad biológica observada se dirige específicamente contra la topoisomerasa tipo II.

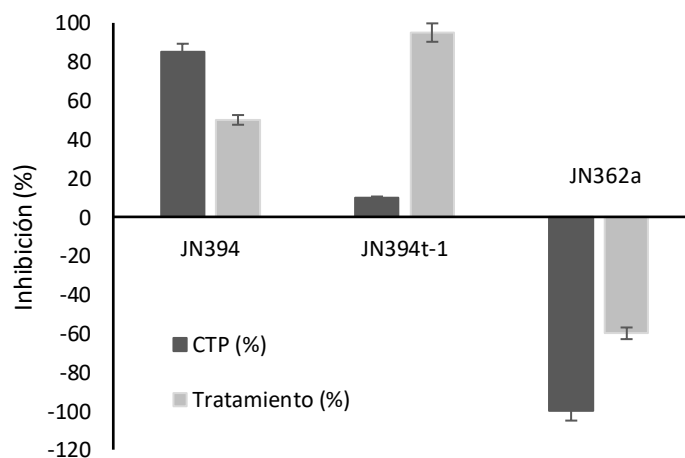


Figura 2. Porcentaje de inhibición de cepas *S. cerevisiae* genéticamente modificadas. CTP: control positivo Camptotecina. Tratamiento: Condiciones óptimas de extracción (10 min, 100 % amplitud, 0.625 s ciclo). Los valores negativos indican crecimiento celular de la cepa.

Figure 2. Inhibition percentage of genetically modified *S. cerevisiae* strains. CTP: positive control Camptothecin. Treatment: optimal extraction conditions (10 min, 100 % amplitude, 0.625 s cycle). Negative values indicate cell growth of the strain.

Estos resultados indican que el extracto acuoso de semilla de *P. dulce*, obtenido mediante extracción asistida por ultrasonido, presenta actividad antitopoisomerasa tipo II. Aunque estudios previos, como el de Gupta et al. (2016) han reportado efectos antiproliferativos de extractos de hojas de *P. dulce* sobre líneas celulares de cáncer de próstata ($\text{GI}_{50} = 3.7 \mu\text{g/mL}$), hasta la fecha no se habían documentado efectos biológicos asociados a las semillas. Este hallazgo aporta evidencia preliminar

sobre el potencial bioactivo de un subproducto vegetal poco explorado y sugiere que podría representar una fuente alternativa de compuestos con actividad biológica relevante. La ausencia de efectos citotóxicos sobre células con mecanismos de reparación intactos, junto con la inhibición observada en células deficientes en topoisomerasa II, apoya la hipótesis de una acción selectiva. En conjunto, estos resultados sientan las bases para estudios posteriores orientados al aislamiento y caracterización de los compuestos activos presentes en las semillas, así como para su evaluación en líneas celulares eucariotas, con miras a su posible aplicación farmacológica o nutracéutica. Hoy en día, existe una creciente búsqueda por matrices ricas en CB y las semillas de guamúchil representan una fuente prometedora, la cual, en la actualidad carece de algún valor agroindustrial. De esta manera, la EAU contribuye a una obtención de CB amigable con el medio ambiente, y a la reducción de desechos generados.

4. Conclusiones

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) permitió optimizar la liberación de compuestos fenólicos y potenciar la capacidad antioxidante de semillas de *Pithecellobium dulce*. El análisis de superficie de respuesta identificó condiciones óptimas de 10 min, 100 % de amplitud y 0.625 s de ciclo, que generaron extractos con alta concentración de fenoles solubles totales y máxima capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP). El extracto obtenido bajo estas condiciones mostró una inhibición global del 51 % y una actividad específica del 21 % sobre topoisomerasa tipo II en cepas de *Saccharomyces cerevisiae*, sin evidencias de citotoxicidad en células con mecanismos de reparación intactos. Estos resultados confirman la eficacia de la EAU como técnica sostenible para obtener extractos bioactivos y constituyen la primera evidencia de actividad antitopoisomerasa en semillas de *P. dulce*. En conjunto, los resultados demuestran que las semillas de guamúchil, tradicionalmente subutilizadas, poseen un alto potencial como fuente de compuestos funcionales aplicables en las industrias nutracéutica y farmacéutica. Futuras investigaciones deberán centrarse en el aislamiento e identificación de los metabolitos responsables de la actividad observada, así como en su validación en modelos celulares y animales para fortalecer su aplicabilidad terapéutica.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, Sánchez-Burgos; metodología, Sánchez-Burgos y Zamora-Gasga; software, Zamora-Gasga; validación, Zamora-Gasga y Pérez-Larios; análisis formal, Sánchez-Burgos y Prado-Guzmán; investigación, Prado-Guzmán y Miramontes-Escobar; redacción-redacción del borrador original, Prado-Guzmán y Miramontes-Escobar; redacción-revisión y edición, Miramontes-Escobar y Sánchez-Burgos; visualización, Pérez-Larios; supervisión; Pérez-Larios; administración del proyecto, Sánchez-Burgos. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

Gladys América Prado-Guzmán agradece la beca al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT- Número de registro: 887668)

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de intereses en la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Aldarhami, A., Bazaid, A. S., Alhamed, A. S., Alghaith, A. F., Ahamad, S. R., Alassmrry, Y. A., ... & Alreshidi, M. (2023). Antimicrobial potential of *Pithecellobium dulce* seed extract against pathogenic bacteria: in silico and in vitro evaluation. *BioMed Research International*, 2023(1), 2848198. <https://doi.org/10.1155/2023/2848198>
- Alvarez-Parrilla, E., De La Rosa, L. A., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2011). Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeño and Serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 163–173. <https://doi.org/10.1021/jf103434u>
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18th ed., Rev. 2005). Association of Official Analytical Chemists International, Gaithersburg, MD, USA
- Barba, F. J., Zhu, Z., Koubaa, M., Sant'Ana, A. S., & Orlie, V. (2016). Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 49, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.TIFS.2016.01.006>
- Borthwick, K. A. J., Coakley, W. T., McDonnell, M. B., Nowotny, H., Benes, E., & Gröschl, M. (2005). Development of a novel compact sonicator for cell disruption. *Journal of Microbiological Methods*, 60(2), 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.MIMET.2004.09.012>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Contreras-López, E., Castañeda-Ovando, A., Jaimez-Ordaz, J., Cruz-Cansino, N. S., González-Olivares, L. G., Rodríguez-Martínez, J. S., & Ramírez-Godínez, J. (2020). Release of Antioxidant Compounds of *Zingiber officinale* by Ultrasound-Assisted Aqueous Extraction and Evaluation of Their In Vitro Bioaccessibility. *Applied Sciences* 10(14), 4987. <https://doi.org/10.3390/app10144987>
- Da Porto, C., Natolino, A., & Decorti, D. (2015). The combined extraction of polyphenols from grape marc: Ultrasound assisted extraction followed by supercritical CO₂ extraction of ultrasound-raffinate. *LWT - Food Science and Technology*, 61(1), 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.LWT.2014.11.027>
- Dhanisha, S. S., Drishya, S., & Guruvayoorappan, C. (2021). Traditional knowledge to clinical trials: A review on nutritional and therapeutic potential of *Pithecellobium dulce*. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 33(2), 133–142. <https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0166>
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry* 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Gupta, M.P., Olmedo Agudo, D.A., Marrone Paredes, N.S., Espinosa Rivas, A.F., & Guerra Torres, C.P. (2016). Evaluación de la actividad antiproliferativa de extractos metanólicos de plantas de la familia leguminosae. *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 21(3). <https://revplantasmedicinales.sld.cu/index.php/pla/article/view/355>

- Hameed, A., Srivastav, Y., Afaq, H., Hashmi, A., & Ahmad, Mohd. I. (2024). Outline of the Pharmacological and Phytochemical Profile of the Jungle Jalebi (*Pithecellobium dulce*). *Asian Plant Research Journal*, 12(2), 22–27. <https://doi.org/10.9734/aprj/2024/v12i2245>
- Hernández-Montesinos, I. Y., Carreón-Delgado, D. F., Lazo-Zamalloa, O., Tapia-López, L., Rosas-Morales, M., Ochoa-Velasco, C. E., Hernández-Carranza, P., Cruz-Narváez, Y., & Ramírez-López, C. (2024). Exploring Agro-Industrial By-Products: Phenolic Content, Antioxidant Capacity, and Phytochemical Profiling via FI-ESI-FTICR-MS Untargeted Analysis. *Antioxidants*, 13(8), 925. <https://doi.org/10.3390/antiox13080925>
- Hevener, K. E., Verstak, T. A., Lutat, K. E., Riggsbee, D. L., & Mooney, J. W. (2018). Recent developments in topoisomerase-targeted cancer chemotherapy. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 8(6), 844–861. <https://doi.org/10.1016/J.APSB.2018.07.008>
- Jensen, L.H., Nitiss, K.C., Rose, A., Dong, J., Zhou, J., Hu, T., Osheroff, N., Jensen, P.B., Sehested, M., & Nitiss, J.L. (2000). A Novel Mechanism of Cell Killing by Anti-topoisomerase II Bisdioxopiperazines*. *The Journal of Biological Chemistry*, 275(3), 2137 - 2146. <https://doi.org/10.1074/jbc.275.3.2137>
- Kavita, K., Sarla, L., & Ojha, K. (2023). Physico-Functional Properties of Jungle Jalebi (*Pithecellobium dulce*) Fruit Powder. *Biological Forum-An International Journal*, 15(5), 897-905. https://www.researchgate.net/publication/372956985_Physico-Functional_Properties_of_Jungle_Jalebi_Pithecellobium_dulce_Fruit_Powder
- Khan, S. I., Nimrod, A. C., Mehrpooya, M., Nitiss, J. L., Walker, L. A., & Clark, A. M. (2002). Antifungal activity of eupolauridine and its action on DNA topoisomerases. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 46(6), 1785–1792. <https://doi.org/10.1128/AAC.46.6.1785-1792.2002>
- Kidak, R., & Ince, N. H. (2006). Ultrasonic destruction of phenol and substituted phenols: A review of current research. *Ultrasonics Sonochemistry*, 13(3), 195–199. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2005.11.004>
- Kulkarni, K. V., & Jamakhandi, V. R. (2018). Medicinal uses of *Pithecellobium dulce* and its health benefits. *J Pharmacogn phytochem*, 7(2), 700-704. <https://www.phytojournal.com/archives/2018.v7.i2.3358/medicinal-uses-of-pithecellobium-dulce-and-its-health-benefits>
- Kumar, R., Usmani, S., Singh, B., Prakash, O., Verma, P., Wahab, S., & Khatoon, S. (2022). A comprehensive review on phytopharmacological perspectives of *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. *Annals of Phytomedicine: An International Journal*, 11(1), 115-120. <https://doi.org/10.54085/ap.2022.11.1.11>
- Martínez-Olivo, A. O., Carlos-Murillo, M. U., Sáyago-Ayerdi, S. G., Sánchez-Burgos, J. A., & Zamora-Gasga, V. M. (2023). Optimization of ultrasonic extraction for enhanced polyphenol profile and antioxidant capacity in mango seeds: a comparative study with thermal extraction. *Food Chemistry Advances*, 3, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100480>
- Momin, R. A., & Nair, M. G. (2002). Antioxidant, cyclooxygenase and topoisomerase inhibitory compounds from *Apium graveolens* Linn. seeds. *Phytomedicine*, 9(4), 312–318. <https://doi.org/10.1078/0944-7113-00131>
- Monroy, R., & Colín, H. (2004). El guamúchil *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, un ejemplo de uso múltiple. *Madera y bosques*, 10(1), 35-53. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011278>
- Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O., & Aguilera, J. M. (2013). Chia Seed (*Salvia hispanica*): An Ancient Grain and a New Functional Food. *Food Reviews International*, 29(4), 394–408. <https://doi.org/10.1080/87559129.2013.818014>

- Nagmoti, D. M., Kothavade, P. S., Bulani, V. D., Gawali, N. B., & Juvekar, A. R. (2015). Antidiabetic and antihyperlipidemic activity of *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth seeds extract in streptozotocin-induced diabetic rats. *European Journal of Integrative Medicine*, 7(3), 263–273. <https://doi.org/10.1016/J.EUJIM.2015.01.001>
- Okeke, U. J., Micucci, M., Mihaylova, D., & Cappiello, A. (2025). The effects of experimental conditions on extraction of polyphenols from African Nutmeg peels using NADESs-UAE: a multifactorial modelling technique. *Scientific Reports*, 15, 4890. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88233-8>
- Özdemir, M., Ak, İ., Coşkun, S., & Ünverdi, N. (2025). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from plants. *Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi*, 35, 1713475. <https://doi.org/10.56833/gidaveyem.1713475>
- Pereira, T. C., Souza, V. P., Padilha, A. P. F., Duarte, F. A., & Flores, E. M. M. (2025). Trends and perspectives on the ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds using natural deep eutectic solvents. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 47, 101088. <https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2024.101088>
- Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 4290–4302. <https://doi.org/10.1021/jf0502698>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Redon, C., Pilch, D. R., Rogakou, E. P., Orr, A. H., Lowndes, N. F., & Bonner, W. M. (2003). Yeast histone 2A serine 129 is essential for the efficient repair of checkpoint-blind DNA damage. *EMBO Reports*, 4, 678–684. <https://doi.org/10.1038/sj.embor.embor871>
- Saura-Calixto, F., Garcia-Alonso, A., Goñi, I., & Bravo, L. (2000). In vitro determination of the indigestible fraction in foods: An alternative to dietary fiber analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3342–3347. <https://doi.org/10.1021/jf0000373>
- Silva-Cristobal, L., Osorio-Díaz, P., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. A. (2010). Chemical composition, carbohydrate digestibility, and antioxidant capacity of cooked black bean, chickpea, and lentil Mexican varieties Composición química, digestibilidad de carbohidratos, y capacidad antioxidante de variedades mexicanas cocidas de frijol negro, garbanzo, y lenteja. *CyTA—Journal of Food*, 8(1), 7-14. <https://doi.org/10.1080/19476330903119218>
- Sneha, D., Prashanth, S., Kaveti, V. S., & Boggula, N. (2020). Systematic review of *Pithecellobium dulce* (Roxb.) benth.: A traditional medicinal herb. *Journal For Innovative Development in Pharmaceutical and Technical Science (JIDPTS)*, 3(05), 1-9. https://jidps.com/paper_issue/systematic-review-of-pithecellobium-dulce-roxb-benth-a-traditional-medicinal-herb/
- Szabo, K., Mitrea, L., Călinoiu, L. F., Teleky, B. E., Martău, G. A., Plamada, D., Pascuta, M. S., Nemeş, S. A., Varvara, R. A., & Vodnar, D. C. (2022). Natural Polyphenol Recovery from Apple-, Cereal, and Tomato-Processing By-Products and Related Health-Promoting Properties. *Molecules*, 27(22), 7977. <https://doi.org/10.3390/molecules27227977>
- Teixeira, B. A. (2023). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from plant sources: optimization, kinetic, and modeling study. Tesis. (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.508>
- Zeng, G., Wang, Y., Zhu, M., Yi, J., Ma, J., Yang, B., Sun, W., Dai, F., Yin, J., & Zeng, G. (2024). Inhibition of DNA Topoisomerase I by Flavonoids and Polyacetylenes Isolated from *Bidens pilosa* L. *Molecules*, 29(15), 3547. <https://doi.org/10.3390/molecules29153547>

- Zhong, X., Zhang, S., Wang, H., Yang, J., Li, L., Zhu, J., & Liu, Y. (2022). Ultrasound-alkaline combined extraction improves the release of bound polyphenols from pitahaya (*Hylocereus undatus* 'Foo-Lon') peel: Composition, antioxidant activities and enzyme inhibitory activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90, 106213. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106213>
- Zhou, Y., Yang, K., Cui, J., Ye, J. Y., & Deng, C. X. (2012). Controlled permeation of cell membrane by single bubble acoustic cavitation. *Journal of Controlled Release*, 157(1), 103–111. <https://doi.org/10.1016/J.JCONREL.2011.09.068>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

TECNOCENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

2683-3360

GUÍA PARA AUTORES



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

Política editorial

Se aceptan manuscritos originales e inéditos de tipo científico y tecnológico, que deberán estar escritos con un lenguaje claro y accesible para lectores con formación profesional o de interés científico, y con una estructura lógica. *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* publica artículos de investigación, notas científicas y artículos de revisión actualizados. Todo manuscrito recibido es revisado en primera instancia por el [Equipo Editorial](#) para verificar que cumpla con el formato y contenido establecido por las normas editoriales de *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*. El Equipo Editorial verificará que el envío cumpla con todos los requisitos de postulación, incluyendo su revisión bajo el software antiplagio iThenticate, donde el porcentaje de similitud con otros trabajos ya publicados (ajenos o propios) deberá ser menor al 10 %. Los artículos se enviarán a revisión con un [Editor Asociado](#) y, una vez revisado y teniendo en cuenta las sugerencias y cambios realizados al manuscrito, los editores asociados determinarán su viabilidad para su publicación, notificándose la aceptación o el rechazo al autor y asignando a un [Editor de Sección](#) especialista en el tema proveniente de nuestro Comité Científico. Si después del proceso de arbitraje, el manuscrito es aceptado, la revista lo enviará al proceso de edición y el responsable se contactará con el autor de correspondencia para la revisión y aprobación de las pruebas de galera. También se le solicitará un resumen gráfico que describa visualmente el contenido del artículo, así como cuatro o cinco aspectos relevantes del trabajo a publicar.

Para evaluar los manuscritos, se aplican los siguientes criterios: rigor científico, calidad y precisión de la información, relevancia del tema y claridad del lenguaje. Los árbitros serán quienes determinarán la calidad científica del manuscrito y su aprobación para su publicación. Los artículos de investigación deben presentar un análisis detallado de los resultados originales, así como un desarrollo metodológico riguroso que resalte los logros científicos. Las notas científicas o comunicaciones cortas deberán mostrar resultados novedosos, modificaciones de técnicas o desarrollo de técnicas emergentes innovadoras. Asimismo, los artículos de revisión deberán abordar temáticas novedosas y fundamentar el estado del arte en una revisión de la literatura actualizada sobre temas actuales y de interés para el lector.

La revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* es acceso abierto diamante por lo que proporciona un acceso abierto e inmediato a su contenido. Su objetivo es ofrecer al público un acceso libre a información científica original e inédita, así como a revisiones críticas actualizadas, para favorecer una mayor difusión global del conocimiento y cumplir así con la normativa de acceso abierto de DOAJ.

Arbitraje

El proceso de evaluación de manuscritos es el siguiente: Un [Editor de Sección](#) del Comité Científico evaluará cada contribución, y podría rechazar trabajos en esta etapa por razones tales como: carecer de originalidad, tener serias deficiencias científicas, un uso inadecuado del lenguaje y de la gramática en general, o que el contenido esté fuera de los alcances de la revista. Los autores deberán proporcionar los datos de contacto completos de cuando menos tres árbitros potenciales adscritos a una institución distinta a la del autor, sin embargo, la asignación de los árbitros para revisión del manuscrito será una decisión de la revista. La revista opera bajo un sistema de doble ciego y favorecerá la participación de revisores externos a la institución y al país de los autores. Tras el proceso de arbitraje, el Editor de Sección emitirá un dictamen respecto a la evaluación del trabajo a los autores el cual puede ser: aceptar este envío o no publicable.



En caso de controversia, el Editor de Sección podrá solicitar una evaluación adicional o dictaminar el manuscrito.

Derechos de autor

Una vez aceptado el manuscrito, se solicitará al Autor enviar el formato de cesión de derechos de autor para la difusión del artículo a *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*. Los autores concederán por escrito a la revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*, la propiedad de los derechos de autor, únicamente para su difusión, los autores retienen su propiedad intelectual, lo que permite que su artículo y materiales puedan ser reproducidos, publicados, editados, fijados, comunicados y transmitidos públicamente en cualquier forma o medio, así como su distribución en el número de ejemplares que se requieran y su comunicación pública, en cada una de sus modalidades, incluida su puesta a disposición del público a través de medios electrónicos, ópticos o de cualquier otra tecnología, con fines exclusivamente científicos, culturales, de difusión y sin fines de lucro.

Los artículos publicados en *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*, se distribuirán amparados bajo la [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](#)

Costo y tiempo de publicación

La Revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* es gratuita y está financiada por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). Se solicita a los autores se inscriban a la Revista para estadísticas de acceso y autoría.

El tiempo para la recepción y envío a revisión será en un máximo de tres días. El tiempo promedio para la primera respuesta de los árbitros es de cuatro semanas. El tiempo estimado para la aceptación del artículo es de tres meses y su publicación dependerá de la cantidad de trabajos que estén en espera de publicación.

Contribuciones

1. Tipos de contribuciones

Las contribuciones se clasifican en artículos de investigación, notas científicas, así como artículos de revisión en español e inglés.

No se aceptan contribuciones que se limiten a reportar información general sin fundamento estadístico, encuestas, composición química, u optimización de formulaciones (superficie de respuesta). Debe haber una aportación científica, tecnológica o ingenieril original, inédita y que no esté siendo considerada para su publicación simultánea en otro medio. Una descripción de los envíos se encontrará en el siguiente apartado.

2. Áreas de las contribuciones

Las áreas que abarca la Revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* son las siguientes: Alimentos, Biológica, Salud, Agropecuaria, Cultura Física, Ingeniería y Tecnología, Química y Recursos Naturales. Al someter su contribución se deberá indicar la categoría que le corresponde. De no ser esto posible, es responsabilidad del autor proporcionar el área sugerida de su contribución.



3. Idioma de las contribuciones

El idioma de las contribuciones será inglés o español. Se recomienda que los autores lleven a cabo una cuidadosa revisión del correcto uso del lenguaje para que los revisores puedan evaluar los méritos científicos del trabajo. Los editores podrán rechazar cualquier contribución que no cumpla los estándares.

4. Preparación y envío de las contribuciones

Es indispensable que el autor se registre para postular el manuscrito a la revista. Se recomienda que el autor complete en su totalidad todos los datos solicitados en su perfil incluyendo su identificador [ORCID](#).

¿No está registrado? [Regístrese aquí](#)

¿Ya está registrado? [Ingresa aquí](#)

Los autores, deberán seguir las directrices del sitio web de la revista para el envío de las contribuciones.

Lineamientos generales para envío de manuscritos

Guía práctica para subir un envío a la plataforma

Las contribuciones deben ir acompañadas de una carta al editor ([Carta de presentación del artículo](#)) en donde explícitamente se describirá la relevancia del trabajo, manifestando que el trabajo no ha sido publicado o está siendo considerado para publicación en otra parte. Así mismo, se hará de manifiesto que la publicación ha sido aprobada por todos los autores y que el manuscrito una vez aceptado no será publicado de la misma forma en otra revista, en inglés, español, o cualquier otra lengua, ni electrónicamente, sin el consentimiento de la revista. Las secciones que integrarán a cada una de las contribuciones se muestran a continuación:

1) Artículos científicos

Se constituirán de los resultados parciales o finales de investigaciones originales fundamentadas en metodologías científicas. Los artículos de investigaciones deben presentar: un análisis detallado de los resultados, así como un desarrollo metodológico original, resaltando los aportes científicos logrados. Estos artículos se conforman de las siguientes secciones:

- a) Título del artículo
- b) Resumen/Abstract
- c) Introducción
- d) Materiales y métodos

Materiales

Métodos



Métodos fisicoquímicos

Métodos biológicos

Métodos estadísticos

- e) Resultados y discusión
- f) Conclusiones
- g) Agradecimientos
- h) Conflicto de interés
- i) Referencias

En la descripción de la sección de Materiales y métodos y Resultados y discusión, puede redactarse y presentarse en una sola sección o estructurarse con subtítulos para una mejor descripción. Deberá tener una extensión de 18 cuartillas como máximo, incluyendo Resumen y Referencias

2) **Notas científicas**

Es una comunicación corta, sobre resultados novedosos, modificaciones de técnicas o desarrollo de técnicas emergentes innovadoras, informes novedosos de investigaciones en el área de agropecuaria, salud, deportes o ingeniería. Para la presentación de este documento, se incluirán las secciones.

- a) Título del artículo
- b) Resumen/Abstract
- c) Texto
- d) Conclusiones
- e) Agradecimientos
- f) Conflicto de interés
- g) Referencias

El texto de las notas científicas, se presentará en forma corrida, pero en forma clara y con coherencia, que permita su fácil comprensión. Deberá tener una extensión máxima de 9 cuartillas, incluyendo Resumen y Referencias

3) **Artículos de revisión**

Se conformarán, de revisiones críticas actualizadas de un tópico en especial novedoso de las áreas temáticas de la revista. El objetivo de estos artículos, es presentar al lector una perspectiva de un tema en específico, a través de su análisis de la información, discusión y tendencias. La estructura de este artículo se conformará de las secciones:

- a) Título del artículo
- b) Resumen/Abstract
- c) Introducción
- d) Texto
- e) Conclusiones



- f) Agradecimientos
- g) Conflicto de interés
- h) Referencias

El texto deberá ser coherente con el objetivo y podrá redactarse con los subtítulos que sean necesarios, para una mayor comprensión del tema. Deberá tener una extensión máxima de 20 cuartillas, incluyendo Resumen y Referencias.

Plantillas de los artículos

La descripción de las secciones están incluidas en la siguiente sección de esta Guía para Autores, además de en la plantilla para cada tipo de artículo: Artículo de Investigación: [Plantilla de Artículo de Investigación](#); Notas científica: [Plantilla de Notas Científicas](#); Artículo de Revisión: [Plantilla Artículo de Revisión](#). En estas se consideran sus especificaciones, las cuales deben ser acatadas por el autor. Asimismo, en cada una de las plantillas vienen las especificaciones del formato de texto (tamaño y tipo de fuente, márgenes, interlineado, etc.) el cual debe estar a una columna. Todas las páginas deben ser numeradas secuencialmente.

Descripción de los elementos de un artículo

Título

Deberá incluir versiones en español e inglés, ser conciso y explicar la naturaleza del trabajo. Este deberá tener una extensión máxima de 20 palabras. La plantilla incluye la sección de autores, los cuales deberán ser correctamente descritos, incluyendo su afiliación. En caso de existir varios autores, deberá indicarse con un asterisco el autor para la correspondencia, así como la cuenta de correo electrónico del mismo.

Resumen

Éste deberá presentarse en español e inglés, respectivamente. Con la extensión máxima de palabras como se muestra en la plantilla. Este debe de incluir en forma clara el objetivo, descripción breve de la metodología, resultados y discusión relevantes conclusiones y aporte del trabajo. En éste se incluirán cinco palabras claves, en español e inglés, que permitan ligar informáticamente el contenido del artículo.

Introducción

La introducción describe el estado actual del conocimiento sobre el tópico de investigación abordado, su justificación e importancia, así como la inclusión de la hipótesis y el objetivo del trabajo. Esta sección no deberá ser mayor a dos cuartillas.

Materiales y métodos

Materiales

En esta sección se describen los materiales o sustancias empleadas para el desarrollo de la investigación. Especificando las características y fuentes de obtención, condiciones de manejo,



almacenamiento y grado de pureza de sustancia o reactivos si ese es el caso. Señalando el nombre de compañías, ciudad y país donde los materiales y sustancias fueron adquiridos.

Métodos

Descripción de técnicas y procedimientos, así como el análisis de datos de los resultados obtenidos. En el caso de metodologías novedosas, estas se describirán detalladamente y cuando sean métodos comunes, se indicará la referencia correspondiente.

Ética de la investigación

Al informar sobre una investigación en la que participen seres humanos, material humano, tejidos humanos, datos humanos (estudios clínicos o pruebas sensoriales), grupos vulnerables y/o animales, favor de seguir las instrucciones de la sección de [Ética y buenas prácticas editoriales de esta revista](#).

Los autores deben declarar en este apartado de «Materiales y métodos» lo siguiente:

1. En investigación con seres humanos debe incluir una declaración ética que especifique lo siguiente:
 - El nombre de la junta de revisión institucional aprobadora o del comité equivalente y el número de autorización.
 - La descripción del consentimiento informado, oral y/o por escrito, de las personas participantes en el estudio.
2. En investigaciones con animales deben incluir una declaración ética obligatoria que especifique lo siguiente:
 - El nombre completo del Comité de Ética pertinente que aprobó el trabajo y el número o números de permiso asociados.
3. Los ensayos clínicos deben citar el registro público en el que se inscribieron.
4. En investigaciones con líneas celulares:
 - Deberá indicarse el origen de las líneas celulares utilizadas.
 - Si la línea es de origen humano, deberá proporcionarse una aprobación del comité de revisión institucional o del comité de ética y confirmarse por escrito el consentimiento informado.

Resultados y discusión

Los resultados y discusión se presentarán en una sola sección. Los resultados podrán presentarse en tablas, figuras, fotografías o datos, los cuales se describirán y se justificarán con base a conocimientos o fundamentos existentes. En esta sección se contrastan los resultados obtenidos con la hipótesis planteada y sus semejanzas o diferencias con resultados de investigaciones previamente realizadas y publicadas. El empleo de tablas y figuras deberá ser en forma complementaria del texto de la sección.

Conclusión

Es una generalización de los resultados obtenidos y representan las aportaciones concretas del estudio. Incluyen magnitudes relativas o absolutas de las respuestas sin argumentación complementaria. Resaltando los aspectos novedosos e importancia de los resultados obtenidos, especificando mejores condiciones o parámetros finales del estudio. Debe mostrar congruencia con el título, resumen y objetivo del trabajo.



Agradecimientos

Esta sección es opcional y tendrá un máximo de cuatro renglones para expresar agradecimientos a personas o instituciones que hayan contribuido a la realización del trabajo.

Conflicto de Interés

Escribir un párrafo señalando la inexistencia de conflicto de intereses, en la publicación de estos resultados.

Declaración de IA generativa y tecnologías asistidas por IA (solo en caso de su uso)

El uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en la redacción científica debe declararse en esta sección.

Esta declaración no se aplica al uso de herramientas básicas, como las utilizadas para comprobar la gramática, la ortografía y las referencias. Si no tiene nada que declarar, no es necesario que añada ninguna declaración.

Referencias

Las referencias que se incluyan en el texto deberán ser pertinentes, originales y modernas; se citarán acorde al formato sistema Harvard, en el cual se incluye el apellido de los autores y año de la publicación entre paréntesis. En el caso de que sean dos autores irán unidos por “y” (Choi y Garza, 2020). Cuando sean más de dos autores, se citará el apellido del primero seguido por “et al.” (en cursiva) y el año de publicación (Gu *et al.*, 2019). Si se citan varias referencias, éstas se separarán por punto y coma y en orden cronológico ascendente (Gu *et al.*, 2019; Choi y Garza, 2020). La relación de autores en la sección de referencias será por orden alfabético de acuerdo al formato APA.

IMPORTANTE: Toda vez que la referencia cuente con el registro internacional **DOI** debe incluirlo utilizando el siguiente formato **<https://doi.org/XXXXXX>**. Aun cuando la referencia no cuente con **DOI**, favor de poner el enlace donde puede ser encontrada.

A continuación, se muestran algunos ejemplos:

Artículos de revistas científicas

Braber, N. V., Vergara, L. D., Rossi, Y. E., Aminahuel, C. A., Mauri, A. N., Cavaglieri, L. R., & Montenegro, M. A. (2020). Effect of microencapsulation in whey protein and water-soluble chitosan derivative on the viability of the probiotic *Kluyveromyces marxianus* VM004 during storage and in simulated gastrointestinal conditions. *LWT*, 118, 108844. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108844>

Capítulos de libros

Ho, Y. C., Chua, S. C., & Chong, F. K. (2020). Coagulation-Flocculation Technology in Water and Wastewater Treatment. In *Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment* (pp. 432-457). IGI Global.



Libros

Low, I. M. (Ed.). (2018). *Advances in ceramic matrix composites*. Woodhead Publishing.

Patnaik, A., & Patnaik, S. (Eds.). (2019). *Fibres to Smart Textiles: Advances in Manufacturing, Technologies, and Applications*. CRC Press.

Patentes

Götz, M. R., Holmgren, K., Larsson, N., Fiebich, B., & Wade, W. (2019). *U.S. Patent Application No. 16/478,514*.

Tesis

Ríos, E. A. (2018). *Incidencia y control de tipos patógenos de Escherichia coli (STEC y EPEC) en leche de vaca y quesos derivados en Castilla y León* (Tesis doctoral, Universidad de León). <http://hdl.handle.net/10612/7957>

Boletín

Kirk, M. D., Angulo, F. J., Havelaar, A. H., & Black, R. E. (2017). Diarrhoeal disease in children due to contaminated food. *Bulletin of the World Health Organization*, 95(3), 233.

Páginas electrónicas

Inegi. (2017). <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>

Base de datos

Wishart, D. S., Feunang, Y. D., Marcu, A., Guo, A. C., Liang, K., Vázquez-Fresno, R., ... & Sayeeda, Z. (2017). HMDB 4.0: the human metabolome database for 2018. *Nucleic acids research*, 46(D1), D608-D617.

Citas la abreviación de la revista TECNOCENCIA CHIHUAHUA en los índices internacionales es *Rev. TECNOCENCIA CHIH.*

Tablas, figuras y ecuaciones, las tablas y figuras deben enviarse en un archivo adjunto al manuscrito; de preferencia en un archivo Word. O bien, crear un archivo comprimido (.zip o .rar) que contenga los archivos de tablas y figuras. Adicionalmente, las tablas y figuras del manuscrito, se colocarán dentro del texto principal en el lugar indicado por los autores, con títulos en español e inglés. El título de la figura debe presentarse como Fig. 1. Título de la figura.

Es recomendable que las figuras se preparen con software específico. Tome en cuenta que el tamaño de las figuras se ajustará en el proceso de edición para ajustarse a los márgenes de impresión. Por ello, se recomienda hacer ejes, cuadros, etc., suficientemente grandes para que resulten legibles aún al reducir el tamaño. Las extensiones aceptables para las figuras son JEPG y TIF, considerando las siguientes características de calidad (en puntos por pulgadas):

- 300 ppp para imágenes a escala de grises o color.



- 600 ppp para combinaciones imagen texto.
- 1,200 ppp para imágenes a línea.

Las tablas deben presentar tres bordes horizontales completos (en la fila de encabezados y al final), cualquier otro borde horizontal debe ser parcial, no deben tener bordes verticales y no se aceptarán en forma de imágenes.

Las ecuaciones deben estar escritas con un editor de ecuaciones y deben aparecer en el manuscrito numeradas con el formato de número arábigo. Las ecuaciones insertadas como imágenes no son aceptables.

En el texto del manuscrito, al referirse a una ecuación debe escribirse de la siguiente manera: Ec. (1) o bien Ecs. (1) -(4), al referirse a una figura, seguir la misma regla, por ejemplo: Fig. 1, o bien Figs. (1) -(5) y al referirse a una tabla, por ejemplo: Tabla 1 o bien Tablas (1) -(3).

Figuras y cuadros (versión para producción)

Las figuras y gráficos deben proporcionarse en el texto principal y numerarse consecutivamente con números arábigos y sus subtítulos respectivos deben incluirse dentro del texto principal en el lugar indicado por los autores.

Cuando se incluyan figuras que contengan fotografías o micrografías, asegurarse que sean de alta resolución para que cada foto tenga al menos 300 ppp para imágenes a escala de grises o color. Todas las fotografías deben contener el nombre del autor.

Tablas (versión para producción)

Las tablas deben proporcionarse en el texto principal y como archivo adjunto, y numerarse con números arábigos. Deben estar incrustados en el texto del manuscrito, en el lugar indicado por el autor. Las tablas deben prepararse con Microsoft Word® 2007 o posterior; no deben importarse de Excel® o Powerpoint®, y deben:

- Tener un número y un título (en inglés y en español)
- Sea auto-explicable
- Tener los dígitos significativos con la desviación estándar definidos de acuerdo con el criterio estadístico
- Mostrar datos que no se muestran en los gráficos
- Tener el formato más simple posible; no está permitido el uso de sombras, color o filas verticales y diagonales
- Solo tienen letras minúsculas en el superíndice que indiquen notas al pie de tabla (abreviaturas, unidades, diferencias estadísticas, etc.). Un ejemplo de tabla se muestra en los formatos de **"Plantillas de artículos"**



Abreviaturas, los nombres científicos se escribirán en cursivas, el género de la especie podrá abreviarse después de que se mencione por primera ocasión en el texto. Las unidades de cualquier dato científico o de laboratorio deberán seguir el sistema internacional de medidas y usar las abreviaturas o símbolos recomendados por las normas internacionales. No deberá usarse punto en las abreviaciones Ej.: kg (NO kg.). Se utilizará espacio entre la cantidad y la unidad o símbolo Ej. 8 cm, 100 %. Las notas a pie de página deberán ser evitadas.

Material adicional, si los autores lo desean, pueden proporcionar material adicional o complementario como soporte al artículo (texto, tablas, figuras o multimedia), el cual estará disponible en la página web de la revista una vez que sea publicado. Si el manuscrito ha sido aceptado, también se le solicitará al autor un resumen gráfico y los puntos relevantes del trabajo. El resumen gráfico debe describir en forma general el contenido del artículo, este resumen debe tener las siguientes características: archivo editable en diapositiva de Powerpoint, NO usar datos, tablas o figuras contenidos en el artículo, contener figuras libres de restricciones de derechos de autor, debe incluir un resumen que incluya de dos a tres enunciados donde se describe los antecedentes, como fue realizado el trabajo y los principales resultados. Los puntos relevantes del trabajo, deberán ser cuatro aspectos alcanzados, presentados en forma de enunciado con un máximo de 80 caracteres con espacios.

Los archivos que el autor deberá preparar para el envío serán:

(Formatos)

El texto principal del manuscrito debe presentarse de la siguiente manera:

1) El manuscrito en Word para producción

Este archivo, corresponde a las "**Plantillas de artículos**" presentadas en esta guía de autores, cuyas características de formato se muestran a continuación.

- Formato Microsoft Word® 2007 (o posterior)
- 10 puntos Palatino Linot
- Espaciado especificado en la plantilla
- Texto completo del manuscrito (extensión de acuerdo al tipo de manuscrito)
- Las figuras, cuadros, tablas, ecuaciones y sus respectivos títulos deben estar incorporados en el texto principal en el lugar indicado por los autores.
- Las páginas deben estar numeradas secuencialmente
- La carta de presentación debe presentarse por separado
- La página principal debe incluir los nombres e instituciones de los autores
- El archivo deberá llamarse "**Apellidos autor producción**".doc.



2) En el manuscrito en Word para revisión

Este archivo es una copia del **manuscrito en Word para producción** pero se editará sin los nombres de los autores e Instituciones para enviar este archivo cegado a revisión con los árbitros.

Este archivo deberá ser nombrado **“Apellidos de autor revisión”.doc**: versión para evaluación del revisor. Las características de formato incluyen las siguientes especificaciones:

- Las líneas del texto al igual que las páginas deben estar numeradas secuencialmente
- **No debe incluir** los nombres e instituciones de los autores ni en la página principal del manuscrito, ni en la información del archivo

3) Carta de presentación de artículo o autoría.

La carta de presentación del manuscrito ([Carta de presentación del artículo](#)) debe incluir la relevancia e importancia del trabajo (un breve texto que describa la relevancia del trabajo de investigación o artículo de revisión de manera concisa (con no más de 100 palabras). Además, incluirá la declaratoria de que el documento presentado no ha sido publicado (parcial o totalmente) ni ha sido sometido a arbitraje simultáneamente en otra revista. Haciendo constar que cuenta con la aprobación para su publicación por los autores y coautores.

4) Los archivos de Tablas y Figuras para producción (especificaciones que se describen en la **sección de Tablas, figuras y ecuaciones** en esta guía)

5) Resumen gráfico (características descritas en la **sección de Material adicional** en esta guía)

Después de verificar el estilo de formato (acorde a la plantilla y especificaciones en esta guía de autores) y crear los archivos de acuerdo a las especificaciones presentadas, continúe con el envío en línea.

¿No está registrado? [Regístrese aquí](#)

¿Ya está registrado? [Ingresa aquí](#)

Una vez registrado en la plataforma de la revista, entrar y dar clic en 'Nuevo envío', después seguir las instrucciones y completar cada una de las 5 pestañas del envío.





UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

**GIMNASIO UNIVERSITARIO
MANUEL BERNARDO AGUIRRE.**



TECNOCENCIA CHIHUAHUA
Revista de ciencia y tecnología