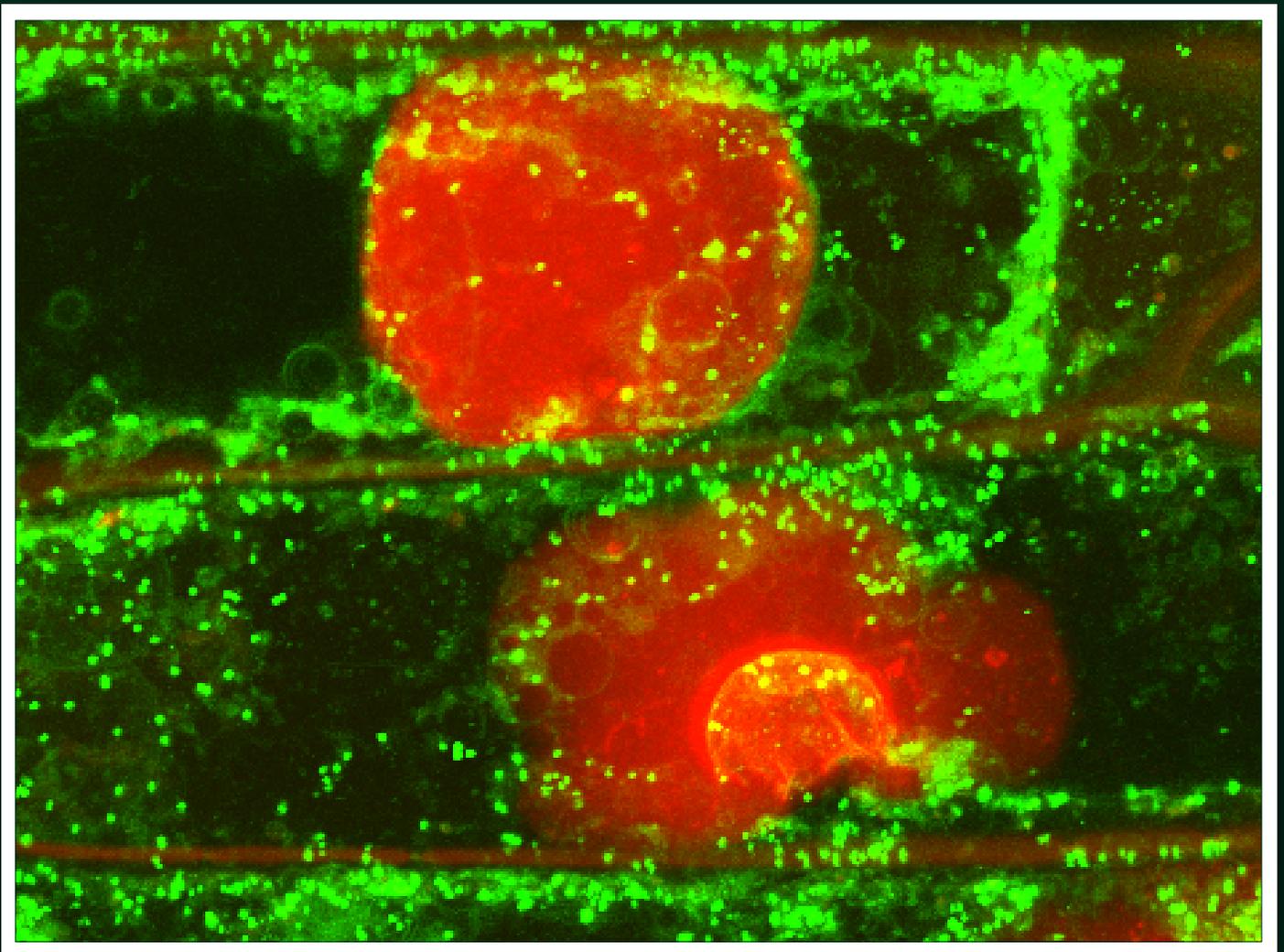


ISSN: 2007-7068

**CN** *Ciencia  
Nicolaita*

94



Agosto de 2025

Revista Científica

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

# *Ciencia Nicolaita*

ISSN: 2007-7068

**Jaime Espino Valencia**

Coordinador de la Investigación Científica

**José López Bucio**

Editor

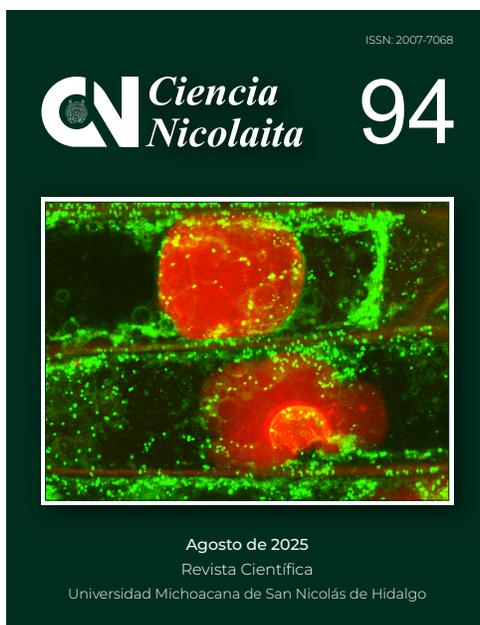
## **Comité Editorial**

**Luca Tessieri**, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, CONAHCyT – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil; **Rosa Elva Norma del Rio Torres**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas; **Joel Edmundo López Meza**, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; **Héctor Eduardo Martínez Flores**, Facultad de Químico Farmacobiología; **Francisco Shidarta Guzmán Murillo**, Instituto de Física y Matemáticas; **José Antonio González Cervera**, Instituto de Física y Matemáticas; **José María Ponce Ortega**, Facultad de Ingeniería Química; **Ernesto García Pineda**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas.

## **Comité Editorial Externo**

**Daniele Colosi**, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

**Apoyo editorial y maquetación:** Fidel Anguiano Rodríguez.



## *Ciencia Nicolaita*

ISSN: 2007-7068

Revista Ciencia Nicolaita número 94, agosto de 2025  
<https://www.cic.cn.umich.mx>

### Imagen de portada

**Descripción:** Lipid droplets, double staining confocal microscopy (green lipid droplets, red nuclei).

|              |    |
|--------------|----|
| Directorio   | i  |
| Contenido    | ii |
| Presentación | iv |

### Biología y Química

**Síntesis de derivados de celulosa obtenidos de especies invasoras para su utilización como mejoradores de suelo**

Johali Estefanía Páez Montes , Sofía Arlette Hoffmann Portilla , Daniel Rojas Solís , Roberto Lindig Cisneros 

1

**Construcción de la síntesis evolutiva moderna: muchos pensadores, diferentes épocas**

Ernesto Vázquez Chimalhua , Tzvetanka D. Dinkova 

10

**Lipid droplets in onion epidermal cells: interactions with the nucleus**

Alejandro López Hernández, Pedro Iván Huerta Venegas<sup>1</sup>, José López Bucio , Jesús Salvador López Bucio 

20

Jasmonic acid induces trichome formation in *Arabidopsis* leaves via the receptor CORONATINE INSENSITIVE 1, and crosstalk with specific auxin signaling components and cell patterning genes  
Javier Raya González , Aarón Munguía Rodríguez, José López Bucio  27

## Ciencias de la Salud

Adherencia terapéutica en pacientes con diabetes mellitus tipo 2 de la consulta externa de una unidad de medicina familiar en Zacapu, Michoacán  
Jonathan Ramón Carranza Avalos, Juan Martín Morales Bedolla, Carlos Sánchez Anguiano, Brenda Paullette Morales Hernández  39

Evaluación del burnout desde una perspectiva de género: desarrollo de una plataforma digital con análisis estadístico e inteligencia artificial  
Aldo Carlos Ruiz Jurado, Edna Araceli Romero Flores , Elizabeth Eugenia Díaz Castellanos, Alma Gabriela Alcalde Pérez, Maricela Gallardo Córdova 46

Polifarmacia e ingesta crónica de medicamentos antiinflamatorios no esteroideos en relación a hemorragia digestiva alta en pacientes mayores de 45 años  
Patricia Zárate Mediano, Gerardo Vargas Nava, Brenda Paullette Morales Hernández  59

## Biotecnología y Ciencias Agropecuarias

Efecto del proceso de extrusión del nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre sus propiedades fisicoquímicas y metabolitos secundarios  
Cynthia M. González Borja, M. Galván Aguilar, Rosa E. Pérez Sánchez, Héctor E. Martínez Flores, Daniel Val Arreola, Ruy Ortiz Rodríguez 66

Producción de inulinasas por *Kluyveromyces marxianus*  
Alejandra Guadalupe Méndez González, Yadira Belmonte Izquierdo, Juan Carlos González Hernández 74

## Ingenierías

Análisis termodinámico de un sistema geotérmico de doble flash con aporte de calor residual de un ciclo Brayton de múltiples etapas  
Irvin Adrián Ríos Domínguez, Víctor M. Ambriz Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas, José E. Acosta-Cano-de-los-Ríos, Diva Y. Saucedo Rojo 81

El problema del diagnóstico de fallas: Análisis comparativo de observadores de estado de tipo Luenberger y Luenberger con modos deslizantes en un sistema de un cuarto de suspensión para un automóvil  
Juan Anzures Marín , Salvador Ramírez Zavala 94

## Miscelánea

- Gobernanza municipal en cogestión para el desarrollo sustentable: un estudio de caso en Michoacán, México**  
Mateo Alfredo Castillo Ceja , Dante Ariel Ayala Ortiz  106
- Cambio estructural en México y Ecuador: el papel de la Inversión Extranjera Directa y nacional, y la apertura comercial**  
Andrés Blancas Neria , Lizeth Ramón Jaramillo  122
- El impacto ambiental de la producción de cobre en el Michoacán Colonial**  
Roberto Lindig Cisneros , Liliana Sánchez Montaña , José Luis Punzo Díaz  137

# Presentación

Ciencia Nicolaita No. 94, Agosto 2025.

Estimados lectores:

El número 94 de **Ciencia Nicolaita** incluye trabajos destacados en el campo de las Ciencias Biológicas, de la Salud, Agropecuarias, Ambientales, Biotecnología, e Ingenierías, que avanzan notablemente el conocimiento, y que contribuyen al desarrollo científico, tecnológico, y cultural. Se presentan trabajos tanto en idioma español como en inglés, dando apertura a que los autores que buscan la diseminación internacional de su obra en el lenguaje científico universal, que es el inglés, encuentren en **Ciencia Nicolaita** el vehículo adecuado para promover su trabajo fuera de nuestras fronteras, sin menoscabo de que los contenidos aquí presentados sigan siendo una referencia importante para académicos, estudiantes y público en general.

En el área de las Ciencias Biológicas se reporta la síntesis de derivados de celulosa obtenidos de especies invasoras para su utilización como mejoradores de suelo para su implementación en la agricultura y se analiza la contribución de una hormona vegetal, el ácido jasmónico en la formación de tricomas, células especializadas de las hojas que participan en la defensa y adaptación ante el agobio ambiental. También se presenta evidencia de la interacción de *lipid droplets* (esferosomas o liposomas), los organelos más pequeños conocidos, con el núcleo en células epidérmicas, lo que implica funciones esenciales que pudieran extenderse no solo a las plantas sino a organismos de diferentes reinos, considerando su ubicuidad. De particular interés para el entendimiento de la teoría de la evolución de las especies, es la revisión sobre la construcción de la síntesis evolutiva moderna, que recibió la contribución de grandes científicos en diferentes épocas.

Es muy satisfactorio contar con tres trabajos en las Ciencias de la Salud, en que se evalúa la adherencia terapéutica en pacientes con diabetes mellitus tipo 2 de la consulta externa de una unidad médica familiar en Michoacán, el estrés crónico laboral (burnout) desde una perspectiva de género, mediante el desarrollo de una plataforma digital con análisis estadístico e inteligencia artificial, y la polifarmacia e ingesta crónica de medicamentos antiinflamatorios no esteroideos en relación a hemorragia digestiva alta en pacientes adultos. Dichos estudios abonan al cuidado de la salud y la prevención de enfermedades. Dos artículos en el área de la biotecnología nos acercan a las aplicaciones del nopal y el uso de microorganismos, para la producción de enzimas y metabolitos

de interés nutracéutico.

La energía geotérmica se encuentra dentro de las energías renovables con mayor aporte en la producción mundial de electricidad. Sin embargo, la cantidad de electricidad que puede producir una planta geotérmica está restringida por la cantidad y características del vapor que es posible enviar al turbogenerador. En este número se presenta el análisis termodinámico de un sistema geotérmico de doble flash con aporte de calor residual de un ciclo Brayton de múltiples etapas, contribuyendo así con la búsqueda de alternativas para mejorar la eficiencia de las plantas geotérmicas. En la industria automotriz, el confort y la estabilidad son características esenciales para que el modelo de un vehículo cumpla con las especificaciones que demanda el mercado actual. En el estudio sobre el problema del diagnóstico de fallas, se condujo un análisis comparativo de observadores de estado de tipo Luenberger y Luenberger como modos deslizantes en un sistema de un cuarto de suspensión para un automóvil. Las pruebas realizadas proporcionan una herramienta útil para el problema del diagnóstico de fallas en sistemas donde se conoce el modelo.

En la sección de Miscelánea se presentan tres trabajos de interés general, por ejemplo, se analizan las consecuencias de la fundición de cobre en Michoacán en tiempos prehispánicos en el suelo y la vegetación. Aquí se destaca la importancia de comprender el impacto histórico de las actividades humanas para evaluar sus efectos actuales y establecer estrategias de manejo sustentable a largo plazo. El trabajo sobre gobernanza municipal en cogestión para el desarrollo sustentable: un estudio de caso en Michoacán, México, enfatiza la necesidad de un procedimiento de cogestión que empodere a la ciudadanía y refuerce la gobernanza municipal en torno a la sustentabilidad, en tanto que el documento “Cambio estructural en México y Ecuador” analiza los cambios generados por la Inversión Extranjera Directa (IED), las inversiones nacionales y la apertura económica en ambos países.

Esperamos que el número actual cumpla las expectativas de los lectores de ***Ciencia Nicolaita*** y que la revista vea incrementada las preferencias para la disseminación de información en el ámbito local y a través de las fronteras.

**José López Bucio**

Editor



# Síntesis de derivados de celulosa obtenidos de especies invasoras para su utilización como mejoradores de suelo

Synthesis of cellulose derivatives obtained from invasive species for their use as soil improvers

Johali Estefanía Páez Montes<sup>1</sup> , Sofía Arlette Hoffmann Portilla<sup>1</sup> , Daniel Rojas Solís<sup>2</sup> , Roberto Lindig Cisneros<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

## Historial

Manuscrito recibido: 10 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 27 de junio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Roberto Lindig-Cisneros

[rlindig@iies.unam.mx](mailto:rlindig@iies.unam.mx)

ORCID: 0000-0003-2542-7038

## Resumen

La búsqueda de materiales alternativos para mejorar la calidad y propiedades del suelo es una necesidad urgente dado el nivel de degradación edáfica que existe a nivel mundial. En este trabajo se realizó la síntesis de carboximetilcelulosa, hidrogeles de carboximetilcelulosa y fibras de rayón derivados de celulosa extraída de dos especies invasoras, *Typha* spp. y *Phragmites australis*. El rendimiento de la celulosa obtenida de la biomasa de las especies invasoras fue en promedio 56%, de carboximetilcelulosa 95.5%, y por cada gramo de ésta se obtuvieron 3.4 g de hidrogel. La obtención de rayón fue más variable, alcanzando mejores resultados con celulosa de *P. australis* con carboximetilcelulosa (99%). Se corroboró la naturaleza química de los productos de síntesis por medio de espectros de infrarrojo. Para analizar efectos en microorganismos del suelo se hicieron ensayos con *Pseudomonas putida* TL36, una bacteria promotora del crecimiento vegetal, indicando que los polímeros son inocuos para la bacteria. Nuestros resultados indican que es factible obtener polímeros potencialmente útiles para la recuperación de suelos degradados a partir de celulosa de especies vegetales invasoras.

**Palabras clave:** hidrogeles, fibras de rayón, carboximetilcelulosa, especies invasoras, microorganismos.

## Introducción

En la actualidad, los problemas derivados de la crisis ambiental, cuyas manifestaciones incluyen el cambio climático, pérdida de biodiversidad y degradación de suelos, obligan a proponer diversas alternativas para mitigar los daños que escalan día con día. Con el

## Abstract

The search for alternative materials to improve soil quality and properties is an urgent necessity given the level of soil degradation that exists worldwide. In this work, the synthesis of carboxymethylcellulose, carboxymethylcellulose hydrogels, and rayon fibers derived from cellulose extracted from two invasive species, *Typha* spp. and *Phragmites australis*, was carried out. The yield of cellulose obtained from the biomass of the invasive species was on average 56%, of carboxymethylcellulose 95.5%, and for every gram of this latter, 3.4 g of hydrogel was obtained. The extraction of rayon was more variable, achieving better results with cellulose from *P. australis* with carboxymethylcellulose (99%). The chemical nature of the synthesis products was confirmed through infrared spectra. To analyze effects on soil microorganisms, tests were performed with *Pseudomonas putida* TL36, a plant growth-promoting bacterium, indicating that the polymers are harmless to the bacteria. Our results indicate that it is feasible to obtain potentially useful polymers for the restoration of degraded soils from cellulose of invasive plant species.

**Keywords:** hydrogels, rayon fibers, carboxymethylcellulose, invasive species, microorganisms.

crecimiento poblacional y las actividades antrópicas que provocan alteraciones en los ecosistemas y un menor acceso a recursos, se refleja de manera clara un mayor requerimiento de alimentos y agua; al mismo tiempo, se puede advertir una preocupación por la calidad de estos bienes. Es bien sabido que la producción de alimentos

depende de la agricultura; sin embargo, la gestión inadecuada del suelo y el agua trae como consecuencias la erosión, la escasez de agua y el agotamiento de los suelos (Bauli *et al.*, 2021; Li y Chen, 2020).

Con el propósito de contribuir a superar estos problemas ambientales, se han establecido distintas líneas de investigación enfocadas en materiales y procesos que ayuden a encontrar soluciones, considerando los posibles impactos ambientales benéficos que justifican su implementación, gestión y distribución (Bauli *et al.*, 2021). Así, se ha planteado el desarrollo de materiales mejoradores de suelos degradados, en particular los que incrementan la capacidad de retención de agua, de origen natural o sintético (Śpitalniak *et al.*, 2021). Entre los segundos destacan compuestos químicos con la capacidad de absorber agua como son los hidrogeles (Miller y Naeth, 2019).

En la búsqueda de una opción más segura y amigable con el medio ambiente para este tipo de materiales, se han estudiado los biopolímeros para sustituir a los materiales sintéticos, considerando las fuentes de obtención, el bajo costo, la disponibilidad y la biodegradabilidad. Algunos reportes recientes han demostrado un gran potencial de biopolímeros mejoradores del suelo, como los hidrogeles o fibras de celulosa, que absorben agua, y podrían ofrecer soluciones innovadoras (Zheng *et al.*, 2023, Ngo *et al.*, 2024, Jaramillo-Quiceno *et al.*, 2024). Además, la investigación sobre hidrogeles muestra resultados prometedores para reducir los impactos ambientales de la lixiviación y pérdida de nutrientes, sobre todo en el ámbito agrícola (Ngo *et al.*, 2024).

La celulosa es un polímero muy abundante en la naturaleza, además de su biodegradabilidad en el medio, no es dañina para organismos presentes en el suelo. Históricamente, se ha obtenido sobre todo de especies arbóreas, pero cabe mencionar que la mayoría de los desechos agrícolas son ricos en celulosa (Li y Chen, 2020), y una fuente potencial son las especies vegetales invasoras.

En general, se considera a una especie como invasora cuando se le ha introducido en sitios fuera de sus áreas de distribución natural, que desplaza a las especies nativas y altera el funcionamiento de los ecosistemas (Pysek *et al.*, 2004), aunque también especies nativas pueden mostrar este comportamiento ante alteraciones antrópicas de los ecosistemas. La proliferación de especies invasoras es la segunda causa de pérdida de la biodiversidad en el planeta (Vitousek y Field, 1999), siendo los humedales particularmente susceptibles (Zedler y Kercher, 2010). Por ejemplo, los tules (*Typha* spp.), que son plantas características de humedales,

pueden mostrar un comportamiento invasivo como respuesta a alteraciones ambientales antropogénicas (Shih y Finkelstein, 2008). El carrizo (*Phragmites australis*), también es considerada una especie invasora, en el caso de México su presencia es abundante en los estados de Chihuahua, Jalisco y Michoacán. Esta especie provoca un desplazamiento de las especies nativas y una degradación de la vida silvestre (Swearingen y Saltonstall, 2010). El manantial de la Mintzita en Morelia, Michoacán, ilustra el problema que representan las especies invasoras, con datos del año 2021 se calculó que *P. australis* cubría al menos el 17.5% del área del humedal (Fuentes-Gutiérrez y Lindig-Cisneros, 2023).

Por otro lado, para los procesos biogeoquímicos del suelo y el crecimiento de las plantas son de gran importancia las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV). Las BPCV benefician el crecimiento y desarrollo de las plantas, su efecto positivo se debe a su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno y fósforo, y para sintetizar hormonas vegetales, como el ácido indolacético y las giberelinas. Entre las BPCV más utilizadas se encuentran especies del género *Pseudomonas*. Estas bacterias tienen una gran versatilidad metabólica y plasticidad genética ya que habitan en diferentes ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos (Sánchez Carrillo y Guerra Ramírez, 2022).

La síntesis de materiales a base de celulosa se ha estudiado con anterioridad teniendo diversas fuentes de materia prima. En este trabajo se utilizó celulosa de especies invasoras para elaborar materiales tendientes a recuperar suelos degradados y mejorar la retención de agua. El objetivo fue probar la viabilidad de elaborar carboximetilcelulosa, hidrogeles de carboximetilcelulosa y fibras de rayón, todos materiales con potencial como mejoradores del suelo y para aumentar la retención de agua, a partir de celulosa extraída de las partes aéreas de *Typha* spp. y *P. australis*, así como evaluar su inocuidad en ensayos *in vitro* con una bacteria promotora del crecimiento vegetal.

## Materiales y métodos

La biomasa de tule y carrizo fue recolectada en el Manantial de la Mintzita (Morelia, Michoacán) y en los humedales del Lago de Cuitzeo (Michoacán). El material fue secado en un horno y procesado en un molino Thomas Scientific Modelo3383-L10 con una criba del número 40, para la obtención de celulosa. Para ello, se empleó el método propuesto por Brendel *et al.* (2000) y Abdulhameed *et al.* (2020) como se describe a

continuación:

El material seco y molido (5 g) de cada una de las especies se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, al que se añadieron 10 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 70% y 100 mL de ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) al 80%. El matraz se trasladó a una parrilla de calentamiento con agitación en una campana de extracción, se ajustó la velocidad a 200 rpm y se aumentó la temperatura progresivamente, en un periodo de tiempo de 1 hora, hasta llegar a 120 °C. La mezcla se dejó enfriar y se agregaron 60 mL de agua destilada y 30 mL de etanol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) al 95% para realizar un lavado. Finalmente, la celulosa obtenida, se filtró y secó en un horno a 35 °C por 12 h y se procesó en un molino.

### Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC)

El proceso para la obtención de CMC a escala laboratorio fue modificado de Terán y Escalera (2007) como se describe a continuación:

**Etapas de inchamiento.** Se pesaron 15 g de celulosa molida y se agregaron a un vaso de precipitados de 500 mL. Se añadieron 200 mL de isopropanol y se agitó a 150 rpm durante 15 minutos, y 30.3 mL de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) diluido al 30% con isopropanol. Se agitó a 250-300 rpm, por espacio de una hora. Es importante destacar que la temperatura en esta etapa del proceso debe mantenerse en un rango de 10 a 12 °C para la obtención exitosa de la CMC.

**Etapas de eterificación.** Se agregó la misma cantidad de disolución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) a la celulosa hinchada. Se preparó una disolución de ácido monocloroacético mezclando 13.3 g del reactivo con 49 mL de isopropanol en una concentración al 87% y se adicionó a la celulosa. Posteriormente, se aumentó la temperatura hasta los 60 °C y se agitó por 3 horas. Se decantó el sólido y se adicionaron 200 mL de isopropanol al 87%, se agitó a 200 rpm por 10 minutos, se dejó reposar por 10 minutos y se decantó nuevamente.

**Neutralización y purificación.** Se neutralizó el sólido filtrado con 3 mL de ácido acético glacial. Se realizaron 2 lavados con etanol al 80% siguiendo el mismo procedimiento del primer lavado, descrito en la etapa anterior. Se realizó el último lavado con etanol al 90%. En este lavado final, el producto se filtró con un matraz Kitasato, un embudo de Büchner, papel filtro y una bomba de vacío, y se dejó secar.

### Síntesis de hidrogeles

Se utilizaron dos métodos para la síntesis de hidrogeles, en el primero se disolvieron 2 g de CMC en 20 mL de agua destilada. Se mantuvo en agitación a 250 rpm durante

una hora a 80 °C. Posteriormente, se añadieron 10 mL de etilenglicol, manteniendo las condiciones de agitación y temperatura durante 2 horas hasta la formación del hidrogel. En el segundo método se disolvió la CMC en 16 mL de agua destilada con agitación constante. Después se añadieron 10 mL de etilenglicol y se llevó al microondas durante 5 minutos con una potencia de 600 W.

### Síntesis de fibras de rayón

Se mezclaron 4.25 g de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) con 14 mL de agua. Se calentó ligeramente y se agitó a 200 rpm hasta su disolución. Se añadió gota a gota y con una agitación de 250 rpm, 1.5 mL de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) con una concentración al 30%. De esta reacción se formó un precipitado con tono azul pálido de hidróxido de cobre ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ). Se filtró el sólido a través del embudo Büchner y se lavó con 10 mL de agua. En 15 mL de amoníaco concentrado se disolvió el hidróxido de cobre ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) obtenido anteriormente. Sobre esta disolución se añadió, agitando constantemente a 300 rpm, 12 g de celulosa o hasta que adquiriera un aspecto viscoso. Se agregó una solución de 50 mL de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) al 5% y se agitó. Se realizaron los lavados correspondientes (aproximadamente 10) con solución de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) hasta que el residuo no presentara un color verde-azul y se filtró. Para la síntesis del material híbrido de celulosa con CMC se repitió el proceso anterior, adicionando 6 g de celulosa y 6 g de CMC o hasta obtener un aspecto viscoso.

### Obtención de espectros de infrarrojo

En el Laboratorio de Análisis Térmico y de Infrarrojo, del Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, de la Universidad Nacional Autónoma de México, los espectros de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) fueron recopilados mediante la técnica de reflectancia total atenuada (ATR-FTIR) empleando un espectrómetro FTIR Nicolet iS10 de Thermo Scientific equipado con un accesorio de muestreo ATR Thermo Scientific Smart iTR™ con un cristal de diamante. Los datos fueron recopilados por una computadora adjunta que ejecuta el software OMNIC. Las muestras sólidas se adicionaron directamente al cristal para su análisis a temperatura ambiente sin aplicar presión. Se obtuvieron y coadicionaron 32 espectros para cada muestra cubriendo un rango de 4000–650  $\text{cm}^{-1}$  a una resolución espectral de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Se obtuvo un espectro de fondo recolectando 32 escaneos coadicionados y posteriormente se efectuó la limpieza del cristal de diamante con acetona.

### Pruebas de crecimiento bacteriano

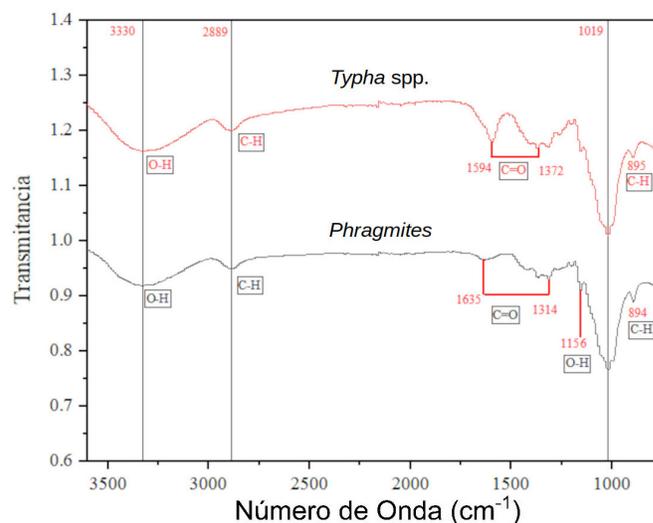
Se realizaron pruebas de confrontación en cajas de Petri de plástico con agar nutritivo (BD Bioxon, Becto Dickinson de México; peptona 5 gr/L, extracto de carne 3 gr/L, agar 15 gr/L) se inoculó a la bacteria *Pseudomonas putida* TL36 y se puso en interacción con los materiales sintetizados. En el caso del hidrogel la interacción llevó a cabo durante 48 h en incubadora a 30-35 °C. Para las fibras de rayón se mantuvieron las mismas condiciones de temperatura de la incubadora, pero el tiempo de interacción fue de 72 h. Se tomó registro diario de la evolución en el crecimiento de las colonias de bacterias con el fin de detectar si se formaba un halo de inhibición alrededor del material. Para determinar la compatibilidad al finalizar los ensayos, se recuperó 1 cm<sup>2</sup> de cada caja y se realizaron diluciones para determinar la cantidad de unidades formadoras de colonia (UFC) presentes en cada tratamiento. Se contó con tres réplicas de cada tratamiento y del control y se hicieron análisis de varianza usando como variable al número de UFC.

Se llevaron a cabo pruebas de cinética bacteriana con fibras de rayón y fibras de rayón con CMC para evaluar el crecimiento bacteriano en presencia de los materiales, esto porque en la síntesis del rayón se utilizó sulfato de cobre que se ha demostrado que en concentraciones altas genera una fase lag en cepas de *P. putida* (Chen *et al.*, 2006). *P. putida* TL36 se creció en caldo nutritivo (BD Bioxon, Becto Dickinson de México; peptona 5 gr/L, extracto de carne 3 gr/L). El crecimiento se midió a una densidad óptica (DO) de 590 nm y se determinó a partir de una DO = 0,1. Al caldo nutritivo se agregaron el 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1.0% y 2.0% de rayón a cada uno de los tratamientos correspondientes. Se realizaron mediciones cada 2, 4, 6, 8, 12, 24, 48 y 72 horas en un espectrofotómetro UV-Vis (GENESYS 20).

## Resultados y discusión

### Extracción de celulosa y síntesis de carboximetilcelulosa

El rendimiento de la celulosa aislada de hojas de *Typha* spp. fue del 54% y en el caso de *P. australis* fue de 58%. Los espectros de FTIR del material obtenido corroboran que se trata de celulosa (**Figura 1**), en donde se pueden apreciar las bandas principales característicos de este compuesto en las cercanías de 3330 cm<sup>-1</sup> que correspondiente a enlaces O-H (Heller *et al.*, 2015), 2900 cm<sup>-1</sup> correspondiente al estiramiento de enlaces C-H (Calderón *et al.*, 2013), 1370 cm<sup>-1</sup> que corresponde a flexión de enlaces C-H (El-Sakhawy *et al.*, 2018), 1017 cm<sup>-1</sup> (esti-



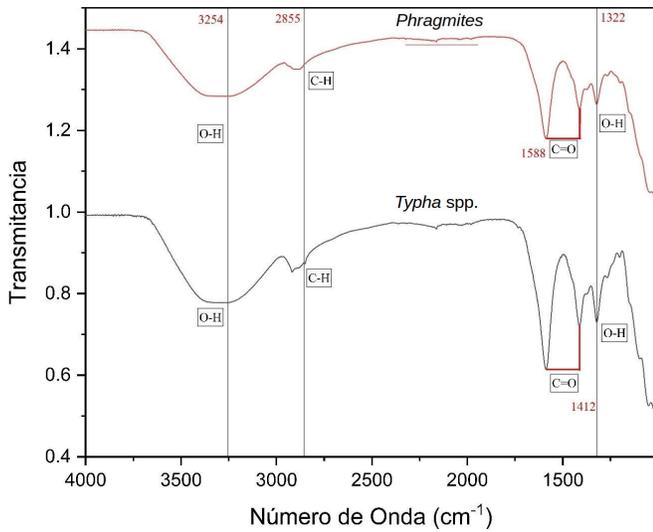
**Figura 1.** Espectros de FTIR de celulosa extraída de las dos especies invasoras, se pueden apreciar las bandas características de este polímero natural.

ramiento C-O en celulosa, hemicelulosa y lignina) y 885 cm<sup>-1</sup> a 895 cm<sup>-1</sup> que corresponde a enlaces beta-glucosídicos entre unidades de glucosa (Adebajo y Frost, 2004; Viera *et al.*, 2007). Cabe mencionar que las señales en la cercanía de 1635 cm<sup>-1</sup> (*Phragmites*) y 1594 cm<sup>-1</sup> (*Typha*) se pueden deber a deformación de agua absorbida o en el caso de *Phragmites*, que contiene lignina en sus tejidos, a vibraciones de enlaces C=O de grupos carbonilo de residuos de lignina. Además, en ~1156 cm<sup>-1</sup> (*Phragmites*) y ~1019 cm<sup>-1</sup> (*Typha*), las cuales son relacionadas a estiramiento asimétrico C-O-C (puente de oxígeno en éteres) y vibraciones de anillo en polisacáridos. Estas bandas sugieren que la celulosa extraída contenía algunas impurezas.

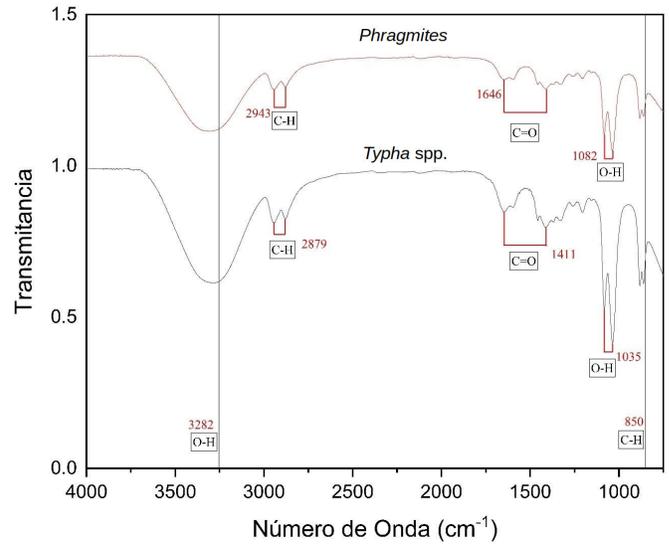
La síntesis de CMC se logró a partir de celulosa de ambas especies con un rendimiento de 93% para *Typha* spp. y de 98% para *P. australis*. Los espectros de FTIR de carboximetilcelulosa (**Figura 2**) se caracterizan por: bandas en 1412.47 cm<sup>-1</sup> (*Typha* spp.) y en 1412.73 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*), que corresponden a los grupos carboxilo (Adinugraha *et al.*, 2005), o a la vibración de estiramiento simétrico y asimétrico del COO (El-Sakhawy *et al.*, 2018); en 1322.22 cm<sup>-1</sup> (*Typha* spp.) y 1322.92 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*) que corresponde a la vibración de flexión de O-H (Mondal *et al.*, 2015); en 1587.91 cm<sup>-1</sup> (*Typha* spp.) y 1588.44 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*), que corresponde al estiramiento en el grupo carboxilato (Calderón *et al.*, 2013) y una banda ancha en 3281.63 cm<sup>-1</sup> y 3254.70 cm<sup>-1</sup> debida a grupos hidroxilo (Heller *et al.*, 2015).

### Hidrogeles y fibras de rayón

De los dos métodos de síntesis utilizados, el segundo re-



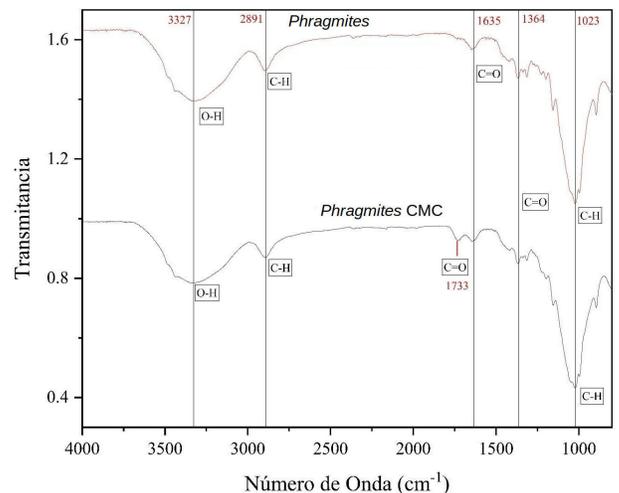
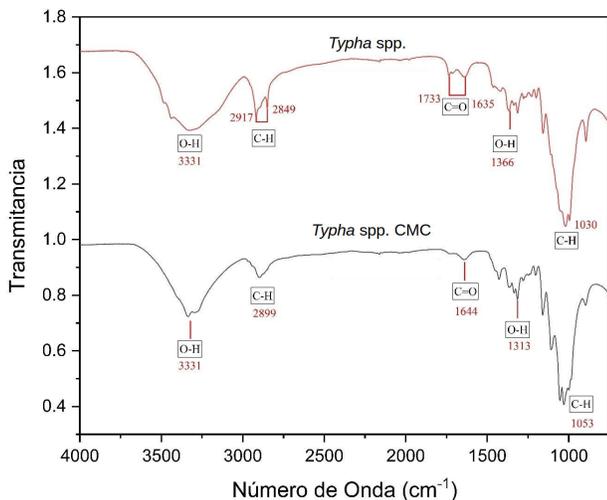
**Figura 2.** Espectros de FTIR de carboximetilcelulosa sintetizada a partir de celulosa extraída de las dos especies invasoras, se pueden apreciar las bandas características de este compuesto.



**Figura 3.** Comparación de FTIR de hidrogeles obtenidos a partir de carboximetilcelulosa de ambas especies invasoras.

sultó mejor debido a que fue más consistente en el rendimiento, además de requerir menor cantidad de agua y tiempo de preparación. En el caso del carrizo, se obtuvieron en promedio 3.6 g de hidrogel por cada gramo de CMC. Para el tule fueron 3.2 g de hidrogel por gramo de CMC. Los espectros de FTIR (**Figura 3**) muestran bandas en 3282.2  $\text{cm}^{-1}$  (*Typha* spp.) y 3282.23  $\text{cm}^{-1}$  (*P. australis*) que es una banda ancha resultante de grupos hidroxilo (Heller *et al.*, 2015); en 2879.65  $\text{cm}^{-1}$  (*Typha* spp.) y 2879.32  $\text{cm}^{-1}$  (*P. australis*) que corresponde al estiramiento en grupos C-H (Calderón *et al.*, 2013); en 1649.52  $\text{cm}^{-1}$  (*Typha* spp.) y 1646.51  $\text{cm}^{-1}$  (*P. australis*) que corresponden a la vibración simétrica de enlaces C-H.

La síntesis de rayón fue satisfactoria con celulosa obtenida de ambas especies invasoras con y sin CMC. El mejor rendimiento fue para el rayón elaborado con celulosa de *P. australis* con CMC (99%), seguido de rayón con celulosa de la misma especie sin CMC (82%); después el rayón elaborado con celulosa de *Typha* spp. sin CMC (73%) y finalmente rayón elaborado con celulosa de *Typha* spp. con CMC (46%). Los análisis de infrarrojo para los dos tipos de rayón elaborados con celulosa de *Typha* spp. y para los elaborados con *P. australis* se muestran en la **Figura 4**, la correspondencia de cada banda de los espectros se presenta en la **Tabla 1** de acuerdo con Gorade *et al.* (2022).



**Figura 4.** Comparación de FTIR de las fibras de rayón elaboradas con celulosa de *Typha* spp. (izquierda) y *Phragmites australis* (derecha) con y sin CMC.

**Tabla 1.** Correspondencia de las bandas de los espectros de FTIR para las fibras de rayón de acuerdo con Gorade *et al.* (2022).

| Fuente de celulosa  | CMC (%) | Banda (cm <sup>-1</sup> ) | Observaciones                    |
|---------------------|---------|---------------------------|----------------------------------|
| <i>Typha</i> spp.   | 0       | 3331.57                   | Vibración del estiramiento O-H   |
| <i>Typha</i> spp.   | 0       | 2917.50                   | Vibraciones del estiramiento C-H |
| <i>Typha</i> spp.   | 50      | 3335.25                   | Vibración del estiramiento O-H   |
| <i>Typha</i> spp.   | 50      | 2899.21                   |                                  |
| <i>P. australis</i> | 0       | 3332.45                   | Vibración del estiramiento O-H   |
| <i>P. australis</i> | 0       | 2891.66                   | Vibraciones del estiramiento C-H |
| <i>P. australis</i> | 50      | 3337.64                   | Vibración del estiramiento O-H   |
| <i>P. australis</i> | 50      | 2891.71                   | Vibraciones del estiramiento C-H |

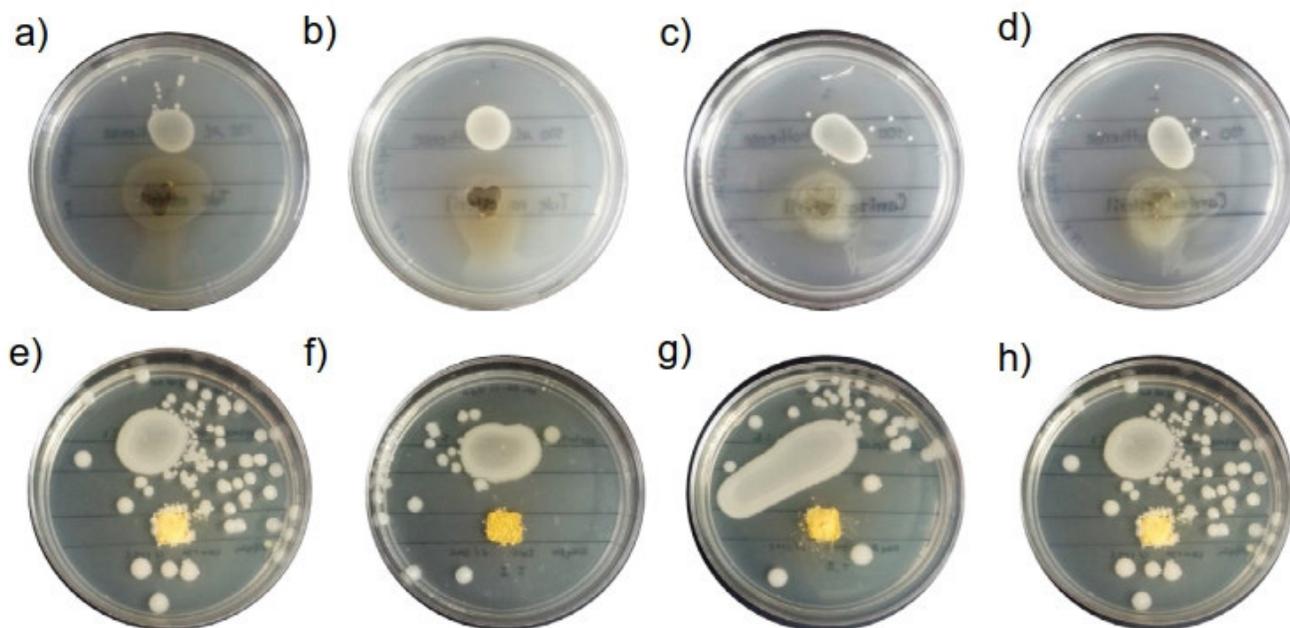
**Ensayos de confrontación y cinética bacteriana**

Los ensayos de confrontación demuestran que, las bacterias confrontadas con el hidrogel no presentan un halo de inhibición como se puede apreciar en la **Figura 5**. En el caso del rayón, en la misma figura se observa la evaluación de la interacción al tiempo final (72 horas).

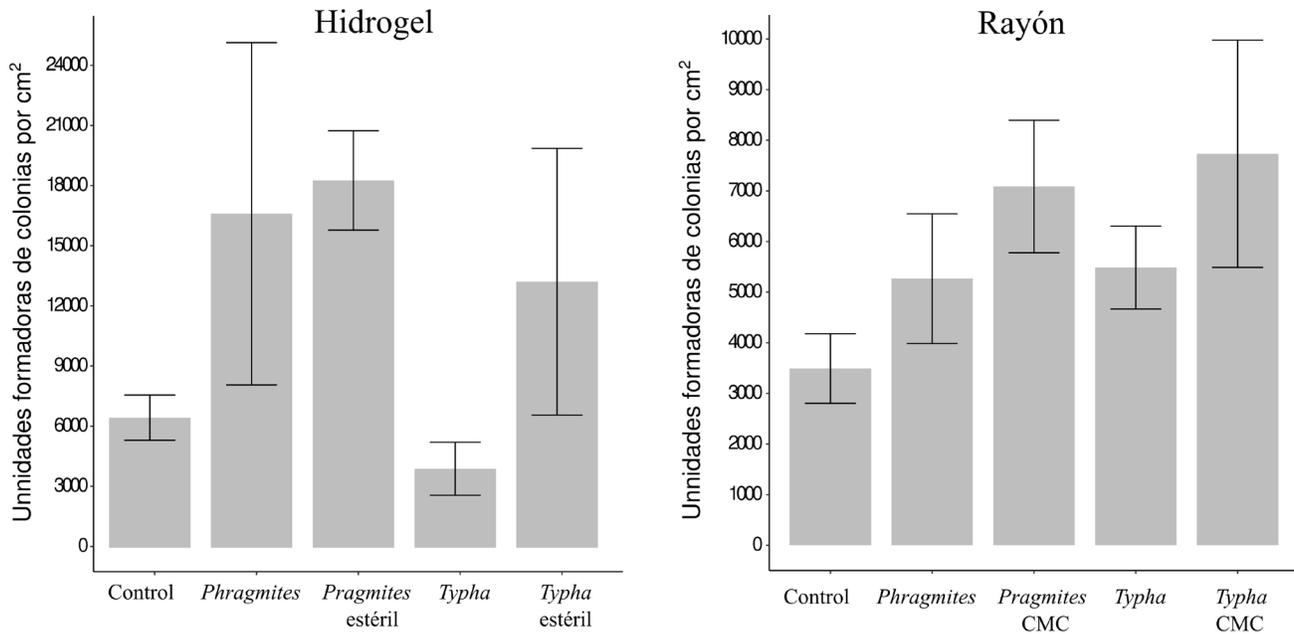
En el inciso e) correspondiente al tratamiento de rayón de tule sin CMS, se observa que no hubo inhibición en el crecimiento bacteriano, inclusive podemos observar colonias que lograron crecer sobre el rayón. En el inciso f) que corresponde al tratamiento del rayón de tule más CMS no logra observarse propiamente un halo de inhibición, aunque las colonias bacterianas ya no crecen de forma tan cercana al rayón. En el tratamiento de rayón de carrizo sin CMS que se representa en el inciso g), tampoco logra observarse un efecto notorio de inhibición. Finalmente, el tratamiento de rayón de carrizo con CMS no muestra efecto alguno sobre el crecimiento bacteriano, inclusive pareciera ser que *P. putida* TL36 la toma como sustrato para crecer.

Para cuantificar el efecto de los hidrogeles y el rayón en el crecimiento de *P. putida* TL36, se procedió al conteo de UFC. Los resultados indican que no hay inhibición derivada de la presencia de hidrogel pues las medias no son estadísticamente diferentes entre sí de acuerdo a los análisis de varianza (**Figura 6**)

En los ensayos de cinética bacteriana (**Figura 7**), se puede apreciar que con excepción del ensayo correspondiente al rayón elaborado con celulosa de *Typha* spp. con CMC, en el resto de los tratamientos se presentó una fase lag para la concentración más alta de rayón (2%), sin embargo, al final el microorganismo logró adaptarse y llegar a la misma concentración que para el resto de



**Figura 5.** Imágenes representativas de los ensayos de confrontación de *P. putida* TL35 con los polímeros. a) tule estéril, b) tule no estéril, c) carrizo estéril, d) carrizo no estéril, e) rayón de tule sin CMS, f) rayón de tule con CMS, g) rayón de carrizo sin CMS y h) rayón de carrizo con CMS.



**Figura 6.** Unidades formadoras de colonias para cada uno de los productos obtenidos a partir de celulosa de especies invasoras, en ningún caso se detectó inhibición.

los tratamientos ( $\approx 1.2$  *Thypha* spp. y  $\approx 1.5$  *P. australis*). Hay que recordar que para la síntesis de rayón se utiliza sulfato de cobre, los iones de cobre producen especies reactivas de oxígeno que rompen la pared celular de los microorganismos, por lo que las bacterias para poder crecer deben activar mecanismos de detoxificación o adaptación lo que retrasa su crecimiento generando una fase de adaptación (Fowler *et al.*, 2019).

## Conclusiones

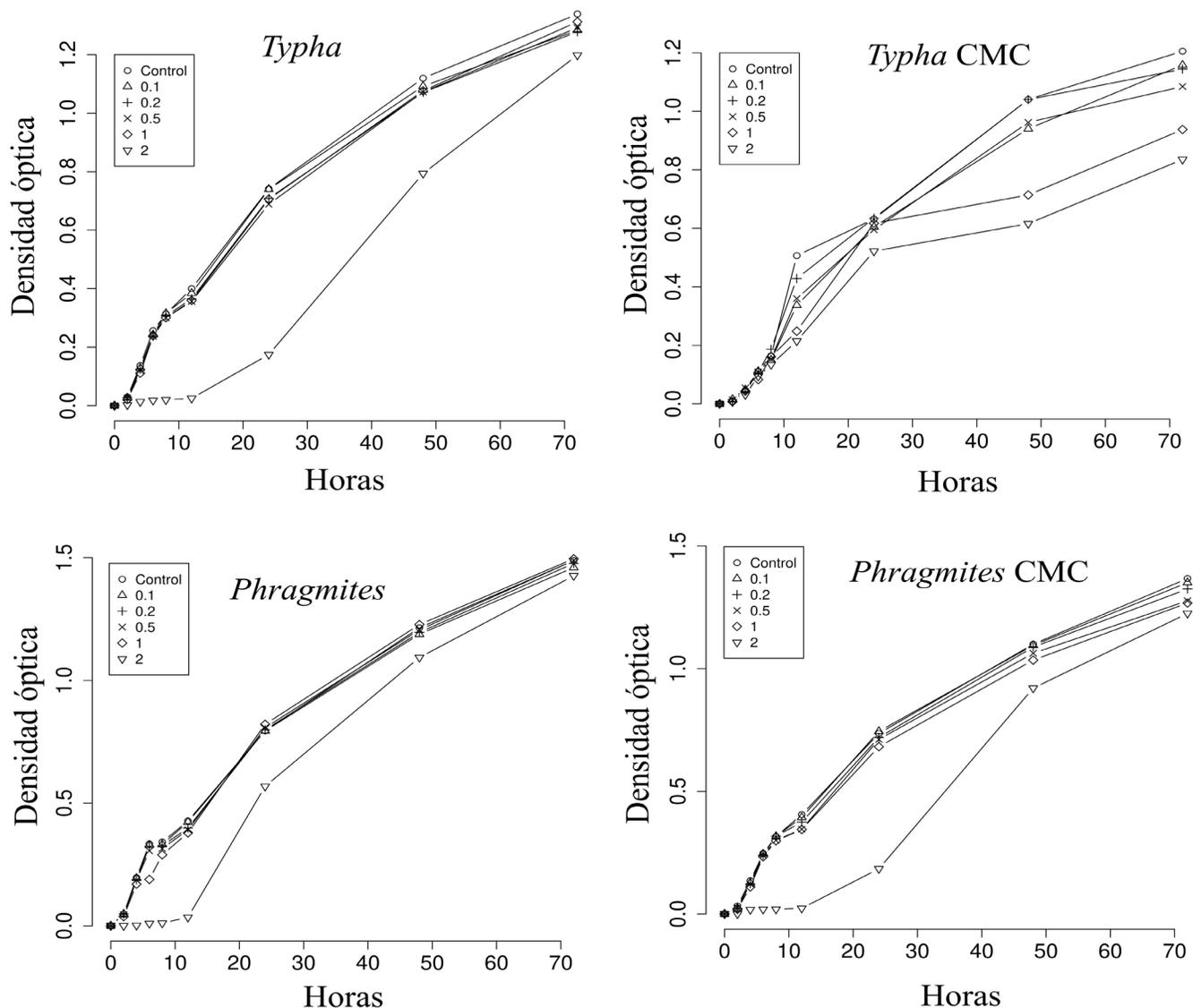
El objetivo principal de esta investigación fue indagar sobre el potencial de la celulosa de *Typha* spp. y *P. australis* para sintetizar carboximetilcelulosa, hidrogeles, fibras de rayón y fibras de rayón con carboximetilcelulosa, por su potencial como materiales mejoradores de suelos degradados. Respecto a la extracción de celulosa y síntesis de carboximetilcelulosa, la especie que dio mejores resultados, en términos de rendimiento, fue *P. australis* con resultados de 58% para la celulosa y 98% para la carboximetilcelulosa. En relación con los hidrogeles, el mejor rendimiento también se obtuvo con la celulosa de *P. australis*, con la que se obtuvo en promedio 3.6 g de masa total del hidrogel por cada gramo de CMC. Se sintetizaron cuatro materiales de fibras de rayón, de los cuales el mejor, en términos de rendimiento de todo el proceso fue la muestra de fibras de rayón de *P. australis* con carboximetilcelulosa. Los materiales no mostraron efectos inhibitorios sobre *Pseudomonas*

*putida* TL36, lo cual sugiere un comportamiento inocuo, esto es importante debido al papel fundamental de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en los procesos del suelo. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para evaluar su compatibilidad ecológica y funcionalidad microbiana.

Los compuestos, sintetizados en el presente trabajo a partir de especies invasoras de dos géneros que no habían sido utilizados con este fin, han mostrado su efectividad como mejoradores del suelo como lo indican estudios previos, tanto por sus propiedades de absorción de agua y como vehículos para la aplicación de fertilizantes (Skrzypczak *et al.*, 2023; Durpekova *et al.*, 2021). Finalmente, para la síntesis de las fibras de rayón sería recomendable explorar rutas que no dependan de compuestos de cobre por su toxicidad potencial.

## Referencias

- Abdulhameed A, Mbuvi HM, Changamu EO (2020). Synthesis of cellulose-based superabsorbent hydrogel from rice husk using a microwave. *American Journal of Materials Science* 10:1-8. doi:10.5923/j.materials.20201001.01.
- Adebajo MO, Frost RL (2004). Infrared and  $^{13}\text{C}$  MAS nuclear magnetic resonance spectroscopic study of acetylation of cotton. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 60:449-453. doi:10.1016/S1386-1425(03)00249-X.
- Adinugraha MP, Marseno DW, Haryadi (2005). Synthesis and characterization of sodium carboxymethylcellulose from cavendish



**Figura 7.** Resultados de los ensayos de cinética bacteriana en presencia de fibras de rayón elaboradas con celulosa de ambas especies invasoras y con adición o no de CMC. La densidad óptica fue determinada a 590 nm.

banana pseudo stem (*Musa cavendishii* LAMBERT). *Carbohydrate Polymers*. 62:164-169. doi:10.1016/J.CARBPOL.2005.07.019.

Bauli CR, Lima GF, de Souza AG, Ferreira RR, Rosa DS (2021). Eco-friendly carboxymethyl cellulose hydrogels filled with nanocellulose or nanoclays for agriculture applications as soil conditioning and nutrient carrier and their impact on cucumber growing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 623:126771. doi:10.1016/j.colsurfa.2021.126771.

Brendel O, Iannetta PPM, Stewart D (2000). A rapid and simple method to isolate pure alpha-cellulose. *Phytochemical Analysis*. 11: 7-10. doi:10.1002/(SICI)1099-1565(200001/02)11:13.0.CO;2-U.

Calderón F, Haddix M, Conant R, Magrini-Bair K, Paul E (2013). Diffuse-reflectance Fourier-transform mid-infrared spectroscopy as a method of characterizing changes in soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 77:1591-1600. doi:10.2136/

SSSAJ2013.04.0131.

Chen X, Shi J, Chen Y, Xu X, Xu S, Wang Y (2006). Tolerance and biosorption of copper and zinc by *Pseudomonas putida* CZ1 isolated from metal-polluted soil. *Canadian Journal of Microbiology*. 52(4):308-316. doi:10.1139/w05-157. PMID: 16699581.

Durpekova S, Di Martino A, Dusankova M, Drohler P, Sedlarik V. (2021). Biopolymer hydrogel based on acid whey and cellulose derivatives for enhancement water retention capacity of soil and slow release of fertilizers. *Polymers* 13(19):3274. doi:10.3390/polym13193274.

El-Sakhawy M, Kamel S, Salama A, Tohamy HAS (2018). Preparation and infrared study of cellulose and amphiphilic materials. *Cellulose Chemistry and Technology*. 52:193-200.

Fowler L, Engqvist H, Öhman-Mägi C (2019). Effect of copper

- ion concentration on bacteria and cells. *Materials*. 12(22), 3798. doi:10.3390/ma12223798.
- Fuentes-Gutiérrez E, Lindig-Cisneros R (2023). Biocultural, productive, and ecocentric restoration in La Mintzita spring-fed wetland, Michoacán, México. *Ecological Restoration*. 41:44-54. doi:10.3368/er.41.1.44.
- GORADE V, CHAUDHARY B, PARMAJ O, KALE R (2022). Preparation and characterization of chi-tosan/viscose rayon filament biocomposite. *Journal of Natural Fibers*. 19:1189-1200. doi:10.1080/15440478.2020.1764442
- Heller C, Ellerbrock RH, Roßkopf N, Klungenfuß C, Zeitz J (2015). Soil organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR-spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity. *European Journal of Soil Science*. 66:847-858. doi:10.1111/EJSS.12279
- Jaramillo-Quiceno N, Carmona ASD, Serna JS, Carmona DM, Torres-Taborda M, Hincapié-Llanos GA, Marín JFS, Álvarez-López C (2024). Enhancing soil water retention and plant growth with thermal crosslinked silk sericin-based hydrogel. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12:112260. doi:10.1016/J.JECE.2024.112260.
- Li S, Chen G (2020). Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: Preparation, performance, and socioeconomic impacts. *Journal of Cleaner Production*. 251:119669. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.119669.
- Miller VS, Naeth MA (2019). Hydrogel and organic amendments to increase water retention in anthroposols for land reclamation. *Applied and Environmental Soil Science*. 4768091. doi:10.1155/2019/4768091
- Mondal MIH, Yeasmin MS, Rahman MS (2015). Preparation of food grade carboxymethyl cellulose from corn husk agrowaste. *International Journal of Biological Macromolecules*. 79:144-150. doi:10.1016/J.IJBIOMAC.2015.04.061.
- Ngo AT, Mori Y, Bui LT (2024). Effects of cellulose nanofibers on soil water retention and aggregate stability. *Environmental Technology and Innovation*. 35:103650. doi: 10.1016/J.ETI.2024.103650.
- Pysek P, Richardson D, Rejmanek M, Webster G, Williamson M, Kirschner J (2004). Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists. *Taxon*. 53:131-143. doi:10.2307/4135498.
- Sánchez Carrillo R, Guerra Ramírez P (2022). *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4):715-725. doi:10.29312/remexca.v13i4.2799.
- Shih JG, Finkelstein SA (2008). Range dynamics and invasive tendencies in *Typha latifolia* and *Typha angustifolia* in eastern North America derived from herbarium and pollen records. *Wetlands*. 28:1-16. doi:10.1672/07-40.1
- Skrzypczak D, Izydorczyk G, Taf R, Moustakas K, Chojnacka K (2023). Cellulose-based fertilizers for sustainable agriculture: Effective methods for increasing crop yield and soil health. *Industrial Crops and Products* 205:117500. doi:10.1016/j.indcrop.2023.117500.
- Swearingen J, Saltonstall K (2010). *Phragmites* field guide: distinguishing native and exotic forms of common reed (*Phragmites australis*) in the United States. *Plant Conservation Alliance, Weeds Gone Wild*. <http://www.nps.gov/plants/alien/pubs/index.htm>.
- Śpitalniak M, Bogacz A, Zięba Z (2021). The Assessment of water retention efficiency of different soil amendments in comparison to water absorbing geocomposite. *Materials (Basel)*. 14(21):6658. doi: 10.3390/ma14216658.
- Terán E, Escalera R (2007). Obtención de CMC a partir de linter de algodón. *Investigación y Desarrollo*. 7:100-113. doi:10.23881/idupbo.007.1-8i.
- Viera RG, Filho GR, de Assunção RM, da Carla C, Vieira JG, de Oliveira GS (2007). Synthesis and characterization of methylcellulose from sugar cane bagasse cellulose. *Carbohydrate Polymers*. 67:182-189. doi:10.1016/J.CARBPOL.2006.05.007.
- Vitousek PM, Field CB (1999). Ecosystem constraints to symbiotic nitrogen fixers: a simple model and its implications. *New Perspectives on Nitrogen Cycling in the Temperate and Tropical Americas: Report of the International SCOPE Nitrogen Project*. 179-202. doi:10.1007/978-94-011-4645-6\_9
- Zedler JB, Kercher S (2004). Causes and consequences of invasive plants in wetlands: opportunities, opportunists, and outcomes. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 23:431-452. doi:10.1080/07352680490514673.
- Zheng H, Mei P, Wang W, Yin Y, Li H, Zheng M, Ou X, Cui Z (2023). Effects of super absorbent polymer on crop yield, water productivity and soil properties: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*. 282:108290. doi:10.1016/J.AGWAT.2023.108290.



# Construcción de la síntesis evolutiva moderna: muchos pensadores, diferentes épocas

Construction of modern evolutionary synthesis: many thinkers, different eras

Ernesto Vázquez Chimalhua\* , Tzvetanka D. Dinkova 

Facultad de Química, Departamento de Bioquímica, Universidad Nacional Autónoma de México.

## Historial

Manuscrito recibido: 25 de junio de 2025

Manuscrito aceptado: 12 de julio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Ernesto Vázquez Chimalhua

belengwer@yahoo.com

ORCID: 0000-0002-3118-4995

## Resumen

La “síntesis evolutiva moderna”, que describe la evolución biológica de los organismos en términos adaptativos, fue construida entre 1930 y 1950. Sin embargo, si consideramos la herencia genética como componente estructural, su origen se desplaza a etapas mucho más tempranas en la historia de la biología. Es una síntesis porque fusiona conceptos de las teorías de la evolución, celular, cromosómica y los amalgama con el respaldo de las ciencias exactas como las matemáticas. En su camino surge la biología molecular, con la dilucidación de la estructura del material genético, y se convierte en un campo fértil para la construcción de una “síntesis evolutiva extendida” que mantiene su vigencia porque se ha adaptado a los cambios en el conocimiento producidos por descubrimientos científicos *a posteriori*. En el presente trabajo se presenta el desarrollo de la síntesis evolutiva moderna, sus arquitectos y tiempos de construcción, quedando de manifiesto que las teorías e ideas van cambiando para originar otra nueva mediante la controversia y el debate entre el pensamiento conservador y los promotores del cambio.

**Palabras clave:** herencia; genética; evolución biológica; historia de la biología.

## Introducción

### Pangénesis, preformismo y epigénesis

La perpetuación del linaje es clave en la continuidad de los organismos; mediante la reproducción y el nacimiento, los nuevos seres vivos cumplen este trascendental propósito. La transmisión de las características físicas de los progenitores a la descendencia es una propiedad de este fenómeno biológico. Entre los siglos V-IV a.C., los filósofos Demócrito, Anaxágoras e Hipócrates plantearon un modelo hereditario conocido como pangénesis, en

## Abstract

The modern evolutionary synthesis, which describes the biological evolution of organisms in adaptive terms, was constructed between 1930 and 1950. However, if we consider genetic inheritance as a structural component, its origin shifts to much earlier stages in the history of biology. It is a synthesis because it merges concepts from the theories of evolution, cellular, chromosomal, and amalgamates them with the support of exact sciences such as mathematics. Along the way, molecular biology emerged, with the elucidation of the structure of genetic material, and it became a fertile field for the construction of an “extended evolutionary synthesis” that remains relevant because it has adapted to changes in knowledge produced by subsequent scientific discoveries. This paper presents the development of modern evolutionary synthesis, its architects, and construction times, making it clear that theories and ideas change to originate another new one through the controversy and debate between conservative thinking and promoters of change.

**Keywords:** inheritance; genetic; biological evolution; history of biology.

el cual, partículas llamadas gémulas provenientes de todas partes del cuerpo y transportadas por el torrente sanguíneo, se mezclaban para formar una simiente que daba origen al nuevo organismo (Cordero Galindo, 2004; Usaquén Martínez, 2009). Con la invención del microscopio, en los siglos XVII y XVIII se pudo identificar a los gametos humanos como componentes hereditarios y se establecieron las teorías del preformismo y epigénesis. En 1677, Anton van Leeuwenhoek junto con Nicolás Hartsoeker, sostenían que dentro de la cabeza del espermatozoide existía un hombre pequeño

u homúnculo. Por otra parte, William Harvey, Marcello Malpighi y Regnier de Graaf teorizaban que en el óvulo yacía un embrión en miniatura preformado. Según estos pensadores, el homúnculo era depositado en el óvulo para su desarrollo, a través del fluido seminal, con el subsecuente desarrollo del embrión dentro del óvulo (Palenque Rocabado *et al.*, 2007; Ferrer Casero, 2016).

A mediados del siglo XVIII, Gaspar Federico Wolff refutó el preformismo contraponiéndolo con la teoría de la epigénesis o desarrollo gradual del organismo. Mediante histología experimental demostró que los órganos de las plantas se originan a partir de tejido indiferenciado. También describió la organogénesis del aparato digestivo y sistema nervioso central del pollo. Contrario al preformismo, la epigénesis estipulaba que los órganos se van formando y diferenciando a partir de una sustancia en estado amorfo homogéneo, conforme el organismo gradualmente se desarrolla y crece hasta su madurez (Palenque Rocabado *et al.*, 2007; Ferrer Casero, 2016).

### Contribuciones de Lamarck, Darwin y Mendel

A inicios del siglo XIX, Jean-Baptiste Lamarck postuló su teoría sobre la herencia y evolución de los organismos en su libro “La filosofía zoológica” publicado en 1809. Los trabajos de Georges Louis Leclerc, Conde de Buffon y Carl von Linné fueron referencia para que Lamarck en su obra planteara el concepto de biología (antes historia natural) y aplicara el sistema binomial de Linné para clasificar las plantas y animales (Usaquén Martínez, 2009; Bajo, 2016). Lamarck sostenía que los cambios fisiológicos ocurren en respuesta a alguna condición ambiental particular. Esto constituía un modelo hereditario teleológico de uso y desuso de los órganos; como su clásica propuesta del alargamiento del cuello de las jirafas para alcanzar la copa de los árboles. Lamarck mantenía una visión vitalista y creía que los organismos se creaban por medio de la generación espontánea a partir de materia inerte. Consecuentemente, cambios progresivos de lo simple a lo más complejo conducirían a su diversificación en diferentes especies, las cuales tendrían distintos propósitos (Usaquén Martínez, 2009; Bajo, 2016; Futuyama y Kirkpatrick, 2017).

Durante la primera mitad del siglo XIX hubo mucha polémica sobre cómo la evolución daba forma a las características heredadas y al desarrollo de los órganos en los animales (Bajo, 2016). Alfred Russel Wallace y Charles Darwin, ambos influenciados por el libro “Ensayo sobre el principio de la población” de Tomas Robert Malthus, y sus viajes intercontinentales que llevó a apreciar la distribución de determinado tipo de organismos en la geografía mundial (Pedroche, 2009).

En su obra “El origen de las especies por medio de la selección natural” publicada en 1859, Darwin propuso que la gran diversidad de especies de animales o plantas divergieron, cambiaron progresivamente y se diversificaron con el paso del tiempo a partir de algún ancestro común, en escala geológica que abarca miles de millones de años.

Las características adaptativas adquiridas por las especies obedecen a una selección natural ejercida por el medio ambiente hasta fijarse a través de la herencia (Futuyama y Kirkpatrick, 2017). Darwin creía en el modelo hereditario pangenético de los antiguos filósofos griegos, consideraba que los pangenes o gémulas podrían alterarse bajo presión selectiva natural y producir los cambios heredados a la descendencia. Sin embargo, no pudo explicar cuáles eran los factores intrínsecos que producen la variabilidad de las características heredadas y generan nuevas especies a lo largo del tiempo (Galera, 2000; Benson, 2001; Noguera Solano y Ruiz Gutiérrez, 2005).

El monje Austriaco Gregor Johann Mendel en su artículo “Experimentos sobre hibridación de plantas” publicado en 1866, propuso un mecanismo hereditario que genera variabilidad morfológica. En el que pudo diferenciar las líneas celulares somáticas de las germinales, indicando que dentro de las células sexuales o gametos existen “factores” heredados que se presentan en pares y controlan las características de los organismos. Un factor es dominante al otro que es recesivo, los pares (alelos) se separan y cada uno entra de manera aleatoria en los gametos (Bateson, 2002). Mendel utilizó plantas de chícharo (*Pisum sativum*) para fundamentar su teoría hereditaria que explica las leyes de distribución igualitaria y segregación independiente de las características, como el color de las flores, alturas de las plantas y estructura de las semillas. Así, aplicó análisis matemáticos para calcular la proporción en que las características aparecían o desaparecían en la progenie a lo largo de las generaciones descendientes (Galera, 2000; Montúfar, 2009).

La teoría de Darwin de la selección natural carecía de un modelo hereditario apropiado, ya que él creía en la pangénesis, mientras que el trabajo de Mendel exponía un modelo de segregación de caracteres con respaldo estadístico. Probablemente, por la incomprensibilidad que tenía Darwin de los trabajos de Mendel, la síntesis evolutiva/hereditaria no se pudo complementar en vida de estos dos excelsos científicos. Para que esto ocurriera, primero tuvieron que ser descubiertos los cromosomas y sus unidades estructurales y funcionales, los genes, de esto hablaremos en la siguiente sección.

### **La teoría cromosómica de la herencia y la genética como antesala de la síntesis evolutiva moderna**

La importancia del trabajo de Mendel no fue reconocida durante su vida, sino hasta 1900, cuando Carl Correns, Erich Von Tschermak y Hugo de Vries redescubrieron sus trabajos. William Bateson le dio un giro al uso del significado de la palabra “genética” como sustantivo para referirse a los factores hereditarios que originan los cambios en las características fisiológicas (Bateson, 2002). Anteriormente, en el siglo XIX, la palabra genética se refería a lo perteneciente o relativo al origen. Cabe mencionar que la etimología de la palabra proviene del griego *genos* (γενής) que significa “que origina, genera o produce” y el sufijo *ikos* (ικός) que expresa “característico de”. Ejemplo del uso antiguo de la palabra genética lo encontramos en 1864, cuando a Darwin lo galardonaron con la medalla Copley de la Real Sociedad Británica por sus contribuciones a la biología genética, refiriéndose aquí a lo perteneciente al origen de los seres vivos (Burkhardt, 2001).

A pesar de sus contribuciones, Bateson era renuente a aceptar la teoría cromosómica de la herencia planteada simultáneamente en 1902 por Walter Stanborough Sutton y Theodor Heinrich Boveri (Bateson, 2002). Dicha teoría tuvo sus bases en experimentos previos realizados por Walther Flemming a mediados del siglo XIX. Estos consistieron en la tinción de núcleos celulares y su observación al microscopio, revelando una red fibrosa que nombró cromatina. Pocos años después Heinrich Waldeyer acuñó el término cromosoma (O'Connor y Miko, 2008). Sutton y Boveri estudiaron los cromosomas de los núcleos de células germinales y somáticas, describieron la división celular meiótica y la distribución aleatoria de cromosomas durante la formación de los gametos. Ambos observaron que los cromosomas en la meiosis se comportaban como los pares de factores Mendelianos durante la producción de los gametos en chícharo y propusieron la teoría cromosómica de la herencia (O'Connor y Miko, 2008).

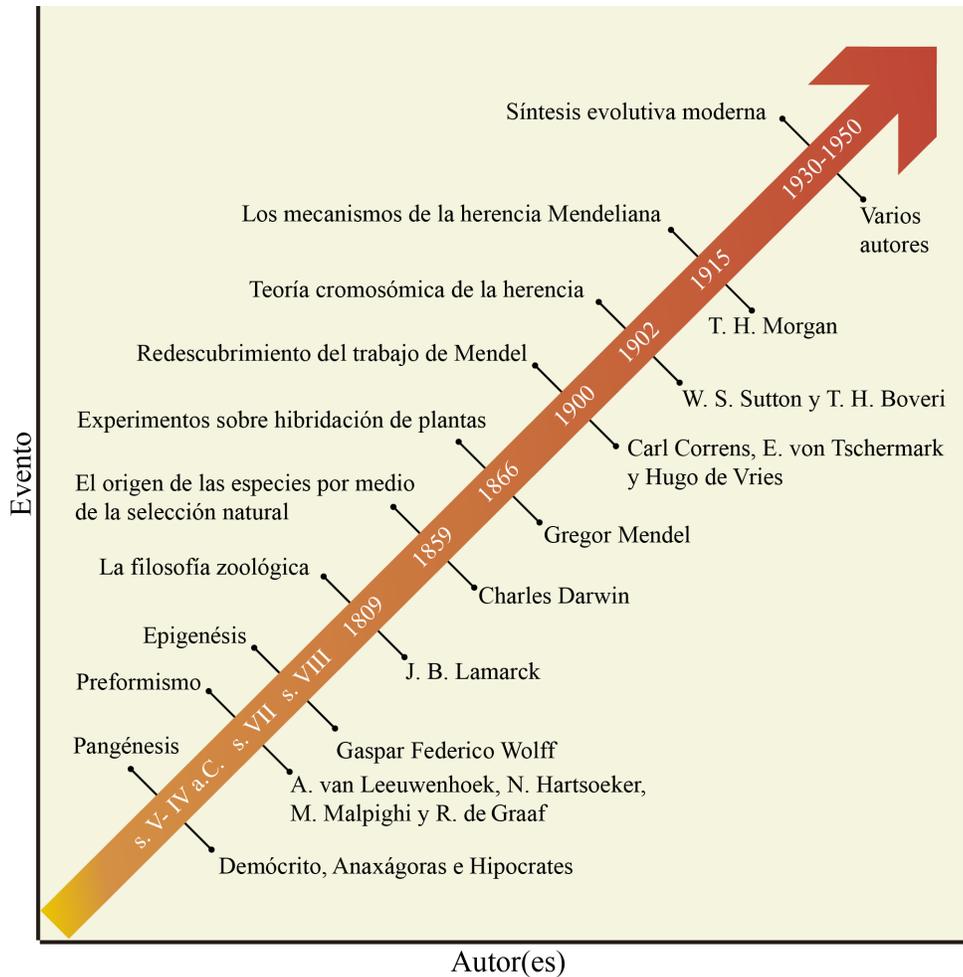
En 1909, Thomas Hunt Morgan publicó una crítica, donde también (como Bateson) exponía su escepticismo a la teoría cromosómica de la herencia, además, se oponía al concepto de gen creado por el botánico Wilhelm Ludvig Johannsen para designar a las unidades de información hereditaria, ya que sostenía que faltaba evidencia experimental (Benson, 2001; Canteras Zubieta, 2012). Morgan se empeñó en estudiar la teoría cromosómica de la herencia usando como modelo biológico la mosca de la fruta (*Drosophila* sp.) y observó que los cromosomas heredados determinan las características del organismo y unos definen el sexo. Encontró que esta mosca posee 4

pares de cromosomas, incluyendo el par de cromosomas sexuales. Las hembras tienen un par de cromosomas sexuales XX, mientras que los machos poseen un par de cromosomas sexuales heteromórficos XY. Morgan también observó que algunos machos tenían ojos blancos en lugar de los ojos rojos de las silvestres y diseñó experimentos de entrecruzamiento para comprender este fenómeno. La forma como segregaba el color de los ojos resultó muy consistente con los patrones de herencia mendelianos, concluyendo que el gen para el color de ojos se encuentra en el cromosoma X y que el alelo (o variante del mismo gen) para ojos blancos es recesivo con respecto al alelo silvestre dominante para ojos rojos. En 1915, Morgan publicó su libro “Los mecanismos de la herencia Mendeliana”, en el cual confirmó la teoría cromosómica de la herencia, al demostrar que los genes se localizan en los cromosomas y son los responsables de los fenotipos o características morfológicas en los organismos. Esto lo asoció con los factores de la herencia Mendelianos e inició el estudio de la herencia de características ligadas al sexo (Benson, 2001; Miko, 2008).

Los descubrimientos hechos por Sutton, Boveri y Morgan aclararon que los factores hereditarios Mendelianos son los genes en los cromosomas. Sin embargo, la frecuencia con la que los genes se heredan y conservan o desaparecen a través de las generaciones durante la selección natural Darwiniana de un organismo fue estudiada por la subsecuente genética de poblaciones, entre los que se encuentran los fundadores de la síntesis evolutiva moderna. Las ideas, hipótesis y teorías en torno al mecanismo biológico de la herencia van cambiando con el paso del tiempo, así, desde la pangénesis de la antigua Grecia hasta el descubrimiento de la estructura del material genético, han atraído la atención de pensadores en las diferentes épocas hasta su estado actual (**Figura 1**).

### **Fundamentos de la síntesis evolutiva moderna**

El historiador de la biología evolutiva Will Ball Provine considera a Ronald Aylmer Fisher, Sewall Green Wright y John Burdon Sanderson Haldane como los fundadores de la síntesis evolutiva moderna, al construir el marco teórico-matemático que la soporta (Sarkar, 2017). Los trabajos publicados en 1930, 1931 y 1932 por R. A. Fisher, S. G. Wright y J. B. S. Haldane, correspondientemente; concatenaron la matemática con la selección natural Darwiniana, la herencia Mendeliana, la teoría cromosómica de la herencia y la genética de Morgan, para fundar la genética de poblaciones. La cual, se dedica a explicar la evolución de los genotipos (total de genes existentes en cada individuo), es decir, la



**Figura 1. Línea de tiempo de los hechos sucesivos más relevantes que edificaron la síntesis evolutiva moderna.** La teoría hereditaria de la pangénesis perduró hasta Darwin. Por su parte, Mendel descubrió la existencia de factores heredables que determinan las características de los organismos. Luego, Sutton, Boveri y Morgan confirmaron que los genes o factores Mendelianos están contenidos en los cromosomas y controlan el desarrollo morfológico de los organismos.

frecuencia con la que genes y sus alelos son heredados a través de generaciones subsecuentes en una población (Dronamraju, 2006; Barton, 2016; Sarkar, 2017).

R. A. Fisher en su obra “La teoría genética de la selección natural” expuso que, durante el proceso de evolución adaptativa de los organismos, las mutaciones genéticas son aleatorias y causan variaciones en las características fisiológicas que son seleccionadas de manera natural. Tales mutaciones pueden coexistir o desaparecer a través de las generaciones, dependiendo de la probabilidad de sobrevivencia que otorguen. (Leigh, 1999; Edwards, 2000; Bacaër, 2011).

Por otra parte, S. G. Wright en su artículo “Evolución en poblaciones Mendelianas”, planteó un modelo matemático para la distribución de la frecuencia de alelos y genotipos, supeditados a presiones evolutivas como la selección natural, mutaciones, migración y la deriva genética aleatoria. Además, Wright pensaba que

las poblaciones se subdividen en pequeños grupos semi aislados donde la composición genética podría diferenciarse parcialmente, por lo que inventó la metáfora del “paisaje adaptativo” para explicar cómo estos cambios sutiles en los genotipos podrían tener diferencias en la adecuación de los organismos al medio ambiente local. De esta manera se desarrolló la “teoría del equilibrio cambiante” que expone cómo estas subpoblaciones variables genéticamente se mueven a través del paisaje ambiental y tienen diferentes picos óptimos de adaptación en determinado espacio geográfico natural. Wright concluye, al igual que Fisher, que, en una población finita, la frecuencia de alelos heredados fluctúa y los de menor ventaja selectiva desaparecerán sucesivamente en las generaciones posteriores (Johnson, 2008; Bacaër, 2011; Barton, 2016).

J. B. S. Haldane publicó su destacado libro “Las causas de la evolución” donde abordó aspectos estáticos y

dinámicos de la evolución poblacional bajo diferentes tipos de presión selectiva, incluyendo la variación intra-específica (dentro de individuos de la misma especie) de genes, cromosomas y características morfológicas. Además, Haldane demostró que la especiación (formación de nuevas especies biológicas) puede iniciarse por el fenómeno de la aloploidia o hibridación entre pequeñas comunidades semi aisladas con su población ancestral. También, Haldane calculó que la probabilidad para que una mutación genética no se extinga o sea fijada en la población de manera estocástica depende de su ventaja adaptativa ante la selección natural, concluyendo, como Fisher y Wright, que las mutaciones deletéreas decrecen esta ventaja selectiva en la población (Dronamraju, 2006; Hammond, 2009; Bacaër, 2011; Sarkar, 2017).

La **Figura 2** muestra como los genes y sus alelos se van seleccionando a través de las generaciones dependiendo de la ventaja adaptativa que otorguen a los organismos ante presiones selectivas naturales como mutaciones, deriva genética y condiciones ambientales.

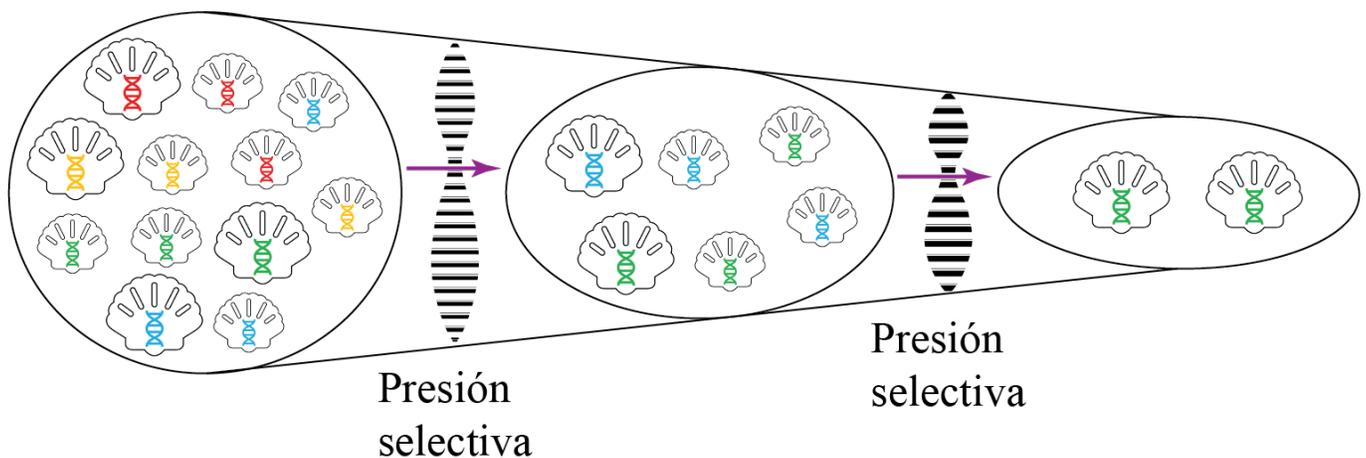
### La construcción de la síntesis evolutiva moderna

Aportaciones fundamentales de Theodosius Dobzhansky, Julian Huxley, Ernst Mayr, George Gaylord Simpson, Bernhard Rensch y George Ledyard Stebbins ocurrieron entre 1930-1950. Dobzhansky en su libro “Genética y el origen de las especies” publicado en 1937, confirmó el marco teórico-matemático de la genética poblacional elaborado por Fisher, Wright y Haldane e integró otros problemas evolutivos fundamentales no representados matemáticamente. También, trató temas como las mutaciones causantes de la variación hereditaria, los arreglos cromosómicos y las diferencias fisiológicas y

genéticas producidas por el aislamiento reproductivo gradual (Ayala, 1985. Gannett, 2013). Dobzhansky formuló el concepto de “especie” como una colección de individuos capaces de reproducirse entre ellos e incapaces de reproducirse o intercambiar genes con otras especies (Ayala, 1985; Gannett, 2013). Es de Dobzhansky el famoso aforismo “*nada en la biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución*”, utilizado ampliamente en las escuelas de biología y ahora de dominio público (Giaino, 2023).

En 1942 se publicó el libro de Julian Huxley titulado “Evolución: La Síntesis Moderna”, en donde se introdujo el término “síntesis” para amalgamar tradiciones de investigación diferentes como la genética experimental, ecología, sistemática, matemáticas y más. Así, surgió una nueva rama de la ciencia llamada “biología evolutiva” que fue progresiva para todos los campos de investigación involucrados (Mayr y Provine, 1981; Lamm, 2011; Corning, 2024). Huxley menciona que para la generación de nuevas especies se necesitan cuatro factores que causan un aislamiento tipo temporal-espacial-biológico, a saber; tiempo (sucesión), espacio (geográfico), función (ecológica) y mecanismos intrínsecos (genéticos y citológicos). Huxley enfatizó sobre el problema que se genera en la práctica taxonómica para acomodar las nuevas especies emergentes y establecer sus relaciones filogenéticas con otros grupos taxonómicos (Lamm, 2011; Corning, 2024).

Ese mismo año de 1942, se publicó el libro de Ernst Mayr “Sistemática y el Origen de las Especies” donde estableció a la sistemática y biogeografía como vitales para el desarrollo de la biología evolutiva y el entendimiento del proceso de especiación. En este trabajo,



**Figura 2. La genética de poblaciones estudia la fluctuación de la frecuencia de genes y sus alelos heredados a través de las generaciones.** Las distintas características en una población como tamaño y color pasan por filtros, mediante la herencia, de diferentes presiones selectivas como mutaciones, deriva genética y selección natural. Lo que resulta en el aislamiento de una población con características y genotipos adaptativos casi homogéneos que puede originar una nueva especie.

Mayr propuso su teoría de la especiación geográfica (alopatría), que consiste en la separación de la población de una especie por barreras físicas naturales como geológicas, acuáticas y de hábitat (Feder *et al.*, 2005; Kulathinal, 2010). Luego, al margen del término de la síntesis evolutiva moderna, propuso la especiación peripátrica (efecto fundador). Tal modo de especiación, se produce como consecuencia de la combinación de la deriva genética, la distribución periférica y subsecuente aislamiento geográfico de un pequeño grupo poblacional, genéticamente variado, que proviene de una población ancestral grande (Meyer, 2005; Kulathinal, 2010; **Figura 3**).

Con influencia de Dobzhansky, Mayr desarrolló el concepto de “especie biológica” como una comunidad de grupos de poblaciones genéticamente aislados y capaces de reproducirse entre ellos, pero incapaces de reproducirse o dejar descendencia viable al cruzarse con otra especie, aunque sea filogenéticamente cercana (Feder *et al.*, 2005; Hey *et al.*, 2005). Filosóficamente, Mayr ayudó a legitimar a la biología como ciencia autónoma e integró a la evolución como parte de esta (Meyer, 2005).

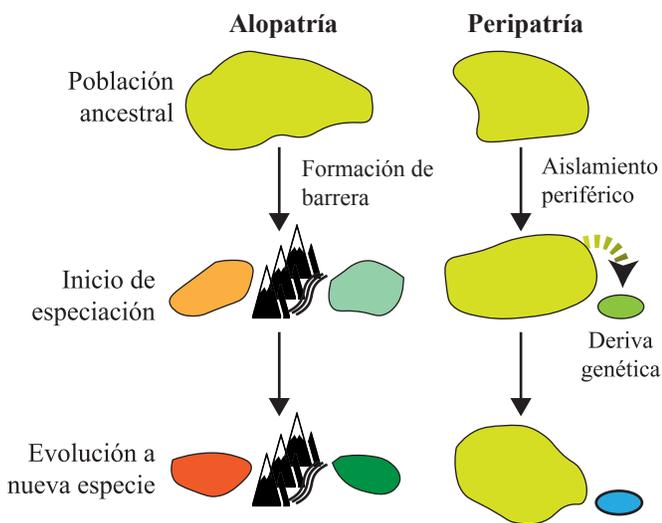
Bajo una visión genética y evolutiva, G. G. Simpson dio un valioso aporte paleontológico a la institucionalización y desarrollo de la síntesis evolutiva moderna mediante el libro “Tempo y Modo en la Evolución” publicado en 1944. Los paleontólogos aportaron al entendimiento de la evolución en tiempos pretéritos (Sepkos-

ki, 2019). Simpson menciona que la evolución de los organismos no es lineal sino ramificada. En una población parental, las variaciones en las características coexisten y en cualquier momento la tendencia evolutiva se puede dividir mediante un aislamiento, usualmente geográfico, que es seguido de una divergencia de especies influenciada por la selección del nuevo nicho ecológico o hábitat. También adujo información de los registros fósiles de amonitas y mostró que, en una población recién originada las características son casi homogéneas, pero con el tiempo recuperan su variabilidad, misma que es importante para una subsecuente especiación (Huxley, 1945; Nyhart y Lidgard, 2021).

El zoólogo alemán Bernhard Rensch contribuyó con su libro “Problemas Recientes en la Teoría de la Descendencia: La Evolución Transespecífica” publicado en 1947. Aunque no era paleontólogo, hizo vasto acopio de registros fósiles para comparar los patrones morfológicos y estudiar las tendencias evolutivas. Se dio cuenta de la evolución infraespecífica, nombrada microevolución por Dobzhansky, o evolución a niveles taxonómicos más bajos que especie (raza o subespecie). Los factores causantes de la microevolución incluyen a la deriva genética, aislamiento sub poblacional, mutaciones, selección natural, flujo genético e hibridación (Simpson, 1961; Reif *et al.*, 2000; Wuketits, 2006).

La dinámica de interacciones entre los mecanismos que originan la microevolución, pero a plazos largos en tiempo geológico, propician la evolución transespecífica o a niveles superiores al de especie, conocida como macroevolución (Simpson, 1961; Reif *et al.*, 2000; Wuketits, 2006). La macroevolución es el fenómeno de acumulación de cambios fenotípicos-morfológicos graduales hasta la aparición de nuevas estructuras básicas o características. De esta manera se separa los niveles taxonómicos superiores al de especie como género y familia, a través de periodos largos de tiempo geológico (Futuyama y Kirkpatrick, 2017). Una tendencia macroevolutiva es la alometría: que es la relación entre la proporción corporal del organismo y la magnitud del crecimiento de alguna característica o parte fisiológica durante su ontogenia. Por ejemplo: la regla de Rensch propone el dimorfismo sexual donde los machos son más grandes que las hembras (o viceversa) y poseen estructuras fisiológicas más exageradas, como en el cangrejo violinista *Uca pugnax* (Adams *et al.*, 2020).

G. Ledyard Stebbins incluyó a la botánica en la síntesis evolutiva moderna con su libro “Variación y evolución en plantas” publicado en 1950. Stebbins formuló el concepto de especie biológica para plantas, el cual es diferente a la especie biológica zoocentrista de Mayr.



**Figura 3. Modos de especiación propuestos por Ernst Mayr.** Durante la construcción de la síntesis evolutiva moderna se plantearon los modos de alopatria y peripatria. La especiación alopátrica es causada por el surgimiento de alguna barrera natural, como la formación de montañas o el cauce de un río. La especiación peripátrica es el resultado de los efectos la deriva genética en una sub población fundadora que se encuentra geográficamente aislada en la periferia de la ancestral y distribuida en un nicho ecológico particular.

Stebbins indicó que una especie de planta adaptada a algún tipo de nicho ecológico específico puede tener poblaciones ampliamente distribuidas, separadas geográfica y temporalmente. Otra diferencia radica en que las plantas reconocen a una pareja complementaria mediante la compatibilidad histológica del gameto masculino o polen en el aparato reproductor femenino o pistilo durante la polinización (Stebbins, 1987; McClure *et al.*, 2011). Stebbins define a la especie cómo un sistema poblacional compuesto de organismos individuales con diferencias genéticas, morfológicas y fisiológicas, los cuales poseen continuidad esencial que es mantenida por su similitud de genes e intercambio libre de estos entre sus miembros (Stebbins, 1987). En conformidad con Mayr, Stebbins menciona que el concepto de especie manejado por un evolucionista es aquel que priorice una visión del estado en el que se encuentra la reproducción de la misma; es decir, si es continua o discontinua (provocada por algún aislamiento). También concuerdan en que la especie es la unidad fundamental de la evolución, dando un enorme impulso al estudio de la biología evolutiva de las plantas (Smocovitis, 2001).

Las contribuciones históricas de los arquitectos de la síntesis evolutiva moderna se presentan en la **Tabla 1**. Dentro de esta se considera como fundadores a los biólogos teóricos-matemáticos creadores de la genética de poblaciones. En el transcurso acontecieron sucesos importantes como el desarrollo del concepto de especie biológica tanto para animales como plantas, la utilización de sistemática y taxonomía como herramientas para realizar análisis filogenéticos, e instauración de la biología como una ciencia con carácter propio.

### Conclusión: de la síntesis evolutiva moderna a la extendida

Las diferentes acepciones del concepto de la herencia que han surgido desde la pangénesis, son la raíz de la síntesis evolutiva moderna. Al tratar de entender el proceso natural de la herencia biológica, nacieron las teorías de la herencia Mendeliana, la selección natural Darwiniana, la teoría cromosómica de la herencia y la disciplina de la genética, las cuales fundaron los pilares conceptuales e ideológicos para la unificación de diferentes tradiciones de estudio, a veces tan lejanas de la biología, como las matemáticas.

Especialmente, la genética contribuyó al responder preguntas sobre la herencia que eran esenciales cómo: ¿qué son esos factores Mendelianos que se heredan en las células gaméticas responsables de la variabilidad de las características?, ¿qué causa en los organismos las variaciones morfológicas que se seleccionan de manera natural durante el proceso de especiación? En 1953, James Watson y Francis Crick descifraron la estructura del material genético, la cual nombraron ácido desoxirribonucleico (ADN) y describieron como un par de hebras complementarias formadas por miles o millones de nucleótidos, apareadas de manera antiparalela, que forman una doble hélice.

Para 1958, Matthew Meselson y Franklin W. Stahl publicaron su artículo “Replicación del ADN en *Escherichia coli*”, donde revelaron que la replicación del ADN es semiconservativa. Es decir, antes de que la célula se divida, el par de hebras de una molécula de ADN parental se separan y cada una sirve como templado para ser complementadas con ADN nuevo, de tal suerte que, con las dos hebras separadas se forman dos moléculas

**Tabla 1.** Obras de los creadores teóricos-matemáticos y conceptuales-filosóficos que fundaron, desarrollaron y consolidaron la síntesis evolutiva moderna.

| Año  | Autor               | Obra  |
|------|---------------------|---|
| 1930 | R. A. Fisher        | La teoría genética de la selección natural  |
| 1931 | Sewall G. Wright    | Evolución en Poblaciones Mendelianas  |
| 1932 | J. B. S. Haldane    | Las Causas de la Evolución  |
| 1937 | T. Dobzhansky       | Genética y el Origen de las Especies  |
| 1942 | Julian Huxley       | Evolución: la Síntesis Moderna  |
| 1942 | Ernst Mayr          | Sistemática y el Origen de las Especies   |
| 1944 | G. G. Simpson       | Tempo y Modo en la Evolución  |
| 1947 | Bernhard Rensch     | Problemas Recientes en la Teoría de la Descendencia: la Evolución transespecífica |
| 1950 | G. Ledyard Stebbins | Variación y Evolución en las Plantas  |

híbridas con ADN parental y nuevo. Tales moléculas de ADN híbrido complementadas son heredadas a la siguiente generación y así, sucesivamente, ocurre con las células recién formadas. Poco después en 1961, François Jacob y Jacques Lucien Monod publicaron su artículo “Mecanismos genéticos reguladores de la síntesis de proteínas” donde caracterizaron el operón lac y propusieron un mecanismo de regulación de la expresión genética y codificación de proteínas controlado por inductores y represores (factores *trans*) que se unen al DNA (elementos en *cis*). Entonces, los descubrimientos dentro de la década posterior a la culminación de la síntesis evolutiva moderna marcaron un punto fundamental para la consolidación de la biología molecular.

En las postrimerías de la década de 1960, Motoo Kimura postuló su “Teoría neutral de la evolución molecular”. La teoría de Kimura plantea que la proporción de mutaciones neutrales y deletéreas es mucho mayor a la de las mutaciones ventajosas o favorables. En su mayoría, son mutaciones que se eliminan por la selección natural purificadora (darwiniana). Aunque, pueden fijarse en la población por el efecto acumulativo de la deriva genética o aleatoriedad, la cual es la principal causa de evolución sobre la selección natural (Duret, 2008; Hugues, 2008).

Tomoko Ohta, en 1973 hizo un corolario del trabajo de su colega Kimura que nombró “Teoría casi neutral de la evolución molecular”. Ohta observó que la frecuencia de mutaciones casi neutras, específicamente las que son ligeramente deletéreas (no sinónimas), dependen del tamaño de la población. En una población pequeña las mutaciones ligeramente deletéreas pueden lograr fijarse debido al cuello de botella genético que ocurre, mientras que en una población grande la frecuencia de estas mutaciones tiende a dispersarse y desaparecer por efecto de la deriva genética (Duret, 2008; Hugues, 2008). El método utilizado por Kimura de la comparación de secuencias de amino ácidos entre diferentes proteínas y la predicción de las mutaciones en el código genético, demostró que en las regiones funcionales de proteínas conservadas a través de los diferentes taxos casi no existen mutaciones (Hugues, 2008).

Stephen J. Gould en 1977 presentó su libro “Ontogenia y filogenia”, la ontogenia estudia el desarrollo de los organismos desde la etapa embrionológica hasta la maduración de sexual y la filogenia estudia la historia evolutiva registrada en los fósiles (Hall, 2012). En su libro, Gould propone a la heterocronía como un mecanismo de evolución adaptativa donde ocurren modificaciones o apariciones de características nuevas durante la ontoge-

nia de los organismos. La heterocronía analiza los cambios en los tiempos de aparición y desarrollo de cierta característica o estructuras en los organismos, desde sus ancestros hasta sus descendientes (Hall, 2012; Evin *et al.*, 2017). Sobre todo, Gould atendió los pedormorfismos (características juveniles ancestrales heredadas a los descendientes y retenidas en su madurez sexual) y sus ventajas en la adaptación ecológica (Lejeune *et al.*, 2021). Separó los pedormorfismos en progénesis y neotenia; en el primer mecanismo, la madures sexual se va acelerando a través de las generaciones descendientes y se conservan los rasgos juveniles somáticos ancestrales; en el segundo mecanismo, se va retardando el progreso del desarrollo somático en relación con el sexual en las sucesivas descendencias (Martynov *et al.*, 2022). Por ejemplo; se ha demostrado que el mecanismo evolutivo de desarrollo (ontogenia) de la sinapsis neuronal en humanos es del tipo neoténico (Wang *et al.*, 2023).

F. Jacob en ese mismo año publicó “El bricolaje de la evolución”. En este artículo sugiere que cambios por mutaciones en las secuencias *cis* del ADN de promotores reguladores de la expresión de genes son causa de evolución de los organismos, debido a que modifican los circuitos regulatorios o vías metabólicas (Jacob, 1977; Gann, 2010). Jacob explica que los circuitos reguladores son muy similares en los primeros pasos del desarrollo embrionario de organismo relacionados, como mamíferos. Conforme el organismo se va desarrollando, aumenta la divergencia operatoria de los circuitos y la heterogeneidad morfológica.

Jacob (1977) sostenía que la especiación se debía a la regulación de los patrones de la expresión genética más que la creación de estructuras novedosas en los constituyentes celulares. Además, menciona que la selección adaptativa de los organismos es resultado de dos principales presiones; una es la interacción del organismo con el medio ambiente, y en consistencia, la otra es la herencia.

Los trabajos de 1977 de Gould y Jacob fueron la base para fraguar una nueva disciplina que llamaron biología evolutiva del desarrollo o evo-devo. Evo-devo liga a la evolución con el desarrollo, y argumenta que la evolución de un linaje está basada en cambios en el desarrollo y aparición de nuevas características que son dirigidas por las mutaciones en las regiones regulatorias *cis* del ADN.

En 1980, Stephen J. Gould hizo notar la relevancia de una nueva síntesis que incluyera los avances recientes de diferentes áreas de investigación. Entre estas se incluyen el desarrollo embrionológico, la herencia no genética o epigenética, la plasticidad fenotípica, la transferencia

horizontal genética, las ciencias “ómicas” por mencionar algunos (Pérez *et al.*, 2010).

Desde su centro conceptual, el marco teórico es un campo fértil para la construcción de una “síntesis evolutiva extendida”. Aquí se contemplan cambios en las visiones de algunos conceptos como la misma evolución, la herencia, el de especie biológica, la interacción recíproca entre ambiente-organismo, flujo genético, la reorganización del sistema taxonómico y demás. La síntesis evolutiva moderna mantiene su vigencia porque se ha adaptado a los cambios en el conocimiento producidos por descubrimientos científicos *a posteriori*, sin embargo, su transmutación hacia una nueva teoría es inminente. Tal como lo hemos venido demostrando a lo largo del presente trabajo, las teorías e ideas van cambiando para originar otra nueva con el paso del tiempo. Durante las transiciones, es una constante la controversia y debate entre los conservadores y los promotores del cambio. Lo mismo está ocurriendo en la actualidad, en donde se necesita una maduración filosófica, conceptual y epistemológica para que se lleve a cabo tal transición.

## Agradecimientos

Ernesto Vázquez Chimalhua agradece a la Dra. Tzvetanka D. Dinkova por la oportunidad de realizar la estancia posdoctoral en su laboratorio. También, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo económico a través del Programa de Becas Posdoctorales de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA).

## Referencias

Adams DC, Glynne E, Kaliontzopoulou A (2020). Interspecific allometry for sexual shape dimorphism: macroevolution of multivariate sexual phenotypes with application to Rensch's rule. *Evolution* 74:1908-1922.

Ayala FJ (1985). Theodosius Dobzhansky 1900-1975. A biographical memoir. *National Academy of Sciences* 55:163-213.

Bacaër N (2011). A short history of mathematical population dynamics: *Springer, London*. ISBN:978-0-85729-114-1.

Bajo JM (2016). Las ideas sobre evolución desde los antiguos griegos a Darwin. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 3:111-121.

Barton NH (2016). Sewall Wright on evolution in mendelian population and the “shifting balance”. *Genetics* 202:3-4.

Bateson P (2002). William Bateson: a biologist ahead of his time.

*Journal of Genetics* 81:49-58.

Benson KR (2001). T. H. Morgan's resistance to the chromosome theory. *Nature Reviews Genetics* 2: 469-474.

Burkhardt FH (2001). Darwin and the Copley medal. *Proceedings of the American Philosophical Society* 145:510-518.

Canteras Zubieta JP (2012). La evolución del concepto de gen: biología, ideología y sociobiología. *Eikasía Revista de Filosofía* 42:83-96.

Cordero Galindo E (2004). Biología y medicina. Una aproximación histórica (1ra de dos partes). *Revista de la Facultad de Medicina UNAM* 47:166-168.

Corning PA (2024). Cooperative genes in smart systems: toward an inclusive new synthesis in evolution. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 189:26-31.

Dronamraju KR (2006). J. B. S. Haldane (1892-1964). En: Malaria: Genetic and Evolutionary Aspects. Emerging infectious Diseases of 21st Century. *Springer, Boston, MA*. ISBN:978-0-387-28294-7.

Duret L (2008). Neutral theory: the null hypothesis of molecular evolution. *Nature education* 1:218.

Edwards AWF (2000). The genetical theory of natural selection. *Genetics* 154:1419-1426.

Evin A, Owen J, Larson G, Debais-Thibaud M, Cucchi T, Vidarsdottir US, Dobney K (2017). A test for paedomorphism in domestic pig cranial morphology. *Biology Letters* 13:20170321.

Feder JL, Xie X, Rull J, Velez S, Forbes A, Leung B, Dambroski H, Filchak KE, Aluja M (2005). Mayr, Dobzhansky, and Bush and the complexities of sympatric speciation in *Rhagoletis*. *Proceedings of the National Academy of Science* 102:6573-6580.

Ferrer Casero EA (2016). Preformismo y epigénesis en la historia de la embriología. *Medisan* 20:2164-2174.

Futuyma DJ, Kirkpatrick M (2017). Evolution, Fourth edition. *Sinauer Associates, Inc. Sunderland, MA*. ISBN:9781605356051.

Galera A (2000). Los guisantes mágicos de Darwin y Mendel. *Asclepio* 52: 213-222.

Gann A (2010). Jacob and Monod: from operons to evodevo. *Current Biology* 20:R718-R723.

Gannett L (2013). Theodosius Dobzhansky and the genetic race concept. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science* 44:250-261.

Gaiimo S (2023). On citing Dobzhansky about the significance of evolution to biology. *Integrative Organismal Biology* 5:obac047.

Hall BK (2012). Evolutionary development biology (evo-devo): past, present, and future. *Evolution: Education and Outreach* 5:184-193.

- Hammond A (2009). J. B. S. Haldane, holism, and synthesis in evolution. *Transactions of the American Philosophical Society* 99:49-70.
- Hey J, Fitch WM, Ayala FJ (2005). Systematics and the origin of species: an introduction. *Proceedings of the National Academy of Science* 102:6515-6519.
- Hugues AL (2008). Near-neutrality: leading edge of the neutral theory of molecular evolution. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1133:162-179.
- Huxley JS (1945). Tempo and mode in evolution. *Nature* 156:3-4.
- Jacob F (1977). Evolution and tinkering. *Science* 196:1161-1166.
- Johnson N (2008). Sewall Wright and the development of shifting balance theory. *Nature Education* 1:52.
- Kulathinal RJ (2010). Commemorating the 20<sup>th</sup> century Darwin: Ernst Mayr's words and thoughts, five years later. *Genome* 53:157-159.
- Lamm E (2011). Review of: Julian Huxley, *Evolution: The Modern synthesis—The definitive edition*, with a new forward by Massimo Pigliucci and Gerd B. Müller. MIT Press, 2010. *Integrative Psychological and Behavioral Science* 45:154-159.
- Leigh EG Jr (1999). The modern synthesis, Ronald Fisher and creationism", *Trends in Ecology and Evolution* 14:495-498.
- Lejeune B, Bissey L, Didaskalou EA, Sturaro N, Lepoint G, Denoël M (2021). Progenesis as an intrinsic factor of ecological opportunity in a polyphenic amphibian. *Functional Ecology* 35:546-560.
- Mayr E, Provine WB (1981). The evolutionary synthesis. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences* 34:17-32.
- Martynov A, Lundin K, Korshunova T (2022). Ontogeny, phylotypic periods, paedomorphosis, and ontogenetic systematics. *Frontiers in Ecology and Evolution* 10:806414.
- McClure B, Cruz-García F, Romero C (2011). Compatibility and incompatibility in S-RNA-based systems. *Annals of Botany* 108:647-658.
- Meyer A (2005). On the importance on being Ernst Mayr. *Plos Biology* 3:e152.
- Miko I (2008). Thomas Hunt Morgan and sex linkage. *Nature Education* 1:143.
- Montúfar GRMG (2009). Mendel y el Neodarwinismo. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas* 30:122-124.
- Noguera Solano R, Ruiz Gutiérrez R (2005). Pangénesis y vitalismo científico. *Asclepio* 57:219-236.
- Nyhart, LK, Lidgard S (2021). Revisiting George Gaylord Simpson's "The role of the individual in evolution" (1941). *Biological Theory* 16:203-212.
- O'Connor C, Miko I (2008). Developing the chromosome theory. *Nature Education* 1:44.
- Palenque Rocabado G, Gamboa Estrada J, Dávalos Crespo F (2007). Desarrollo de la embriología como ciencia. *Cuadernos* 52:125-129.
- Pedroche FF (2009). La síntesis moderna en Biología. Eclecticismo o la complementariedad de un gran paradigma. *Casa del Tiempo* 2:32-38.
- Pérez JE, Alfonsi C, Muñoz C (2010). Towards a new evolutionary theory. *Interciencia* 35:862-868.
- Reif WE, Junker T, Hoßfeld U (2000). The synthetic theory of evolution: general problems and the German contribution to the synthesis. *Theory in Biosciences* 119:41-91.
- Sarkar S (2017). Haldane's *The causes of evolution* and the modern synthesis in evolutionary biology. *Journal of Genetics* 96:753-763.
- Sepkoski D (2019). The unfinished synthesis?: paleontology and evolutionary biology in the 20th century. *Journal of the History of Biology* 52:687-703.
- Simpson GG (1961). A basic work on evolutionary theory. *Evolution* 15:112-113.
- Smocovitis VB (2001). G. Ledyard Stebbins and the evolutionary synthesis. *Annual Review of Genetics* 35:803-814.
- Stebbins GL (1987). Species concepts: semantics and actual situations. *Biology and Philosophy* 2:198-203.
- Usaquén Martínez W (2009). El origen de las especies y su relación con el inicio de la actual teoría de la herencia. *Acta Biológica Colombiana* 14:77-84.
- Wang L, Pang K, Zhou L et al. (2023). A cross-species proteomic map reveals neoteny of human synapse development. *Nature* 622:112-119.
- Wuketits FM (2006). Bernhard Rensch, german evolutionist. *Biological Theory* 1:410-413.



# Lipid droplets in onion epidermal cells: interactions with the nucleus

Alejandro López Hernández<sup>1</sup>, Pedro Iván Huerta Venegas<sup>1</sup>, José López Bucio<sup>1</sup> , Jesús Salvador López Bucio<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio A1', Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. CP 58030.

<sup>2</sup> CONAHCYT, Investigador por México, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio A1', Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. CP 58030.

## Dates

Received: 27 June 2025

Accepted: 3 August 2025

Published: August 2025

## \*Corresponding author

Jesús Salvador López Bucio

salvador.bucio@umich.mx

ORCID: 0000-0002-6173-8645

## Abstract

Lipid droplets are the smallest organelles of eukaryotic cells, presumably with storage, metabolic and regulatory functions. To understand the role of lipid droplets in organelle coordination, in this work we analyzed the morphology and distribution of these oil bodies in epidermal cells in fresh preparations of white and red onions using differential interference contrast (DIC) microscopy. Cytological observations unveiled large extensions of membrane-bound cytoplasmic compartments that interact with the nuclear envelope, and peripheral tubular structures that transport lipid droplets. The lipid content of epidermal cell vesicles was confirmed by BODIPY493/503 staining and confocal microscopy, while Lugol staining enabled observation of the nuclear/organelle extensions that reach the whole cell. The functional relevance of such inter-organellar movement of lipid droplets appears to be the delivery of lipids for membrane construction as well as nuclear proteins.

**Keywords:** Dynamic organelles, vesicular trafficking, nuclear shape, onion epidermal cells, lipid droplets.

## Introduction

Intracellular communication through organelles is vital for a variety of functions and depends on the movement promoted by cytoplasmic currents, the configuration of the endoplasmic reticulum (ER), and the cytoskeleton (Tikhomirova *et al.*, 2022). The ER, whose functions range from the synthesis of proteins and lipids to the production of other organelles and different types of vesicles was first described in the 1890s, later on with the use of electron microscopy its presence was demonstrated in both animal and plant cells (Hu *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2012; Kriechbaumer and Brandizzi, 2020). Understanding how the spatial and temporal distribution of organelles is orchestrated to perform their functions is a great challenge in systems biology.

Lipid droplets are the smallest known organelles, surrounded by a single membrane and containing neutral lipids and proteins with different functions. The droplets originate from specific domains within the endoplasmic reticulum (Wright *et al.*, 2025) and act both as energetic cell components or to deliver specific proteins to organelles (Stephenson *et al.*, 2021; Hamade *et al.*, 2025).

Studies of subcellular structure in different plant species, including oat and barley coleoptyls, *Elodea* leaves, and onion bulb epidermis, allowed the identification of a dynamic, filamentous membrane network that was associated with rapid movements of lipid droplets (Allen, 1981). In onion epidermal cells, these movements are unidirectional and in parallel with actin fibers that assist cytoplasmic currents, which cease rapidly after application of cytochalasine B, a mycotoxin that inhibits the formation of contractile microfilaments (Allen and Brown, 1988) or by exposure to ultraviolet light (Quader and Schnepf, 1986).

Treatment with inhibitors established an important role for microtubules and the actomyosin system for lipid droplet movement. Long-term treatments (hours) with colchicine, an inhibitor of microtubule polymerization, caused the aggregation of organelles and ended lipid droplet movement (Allen and Brown, 1988). More recently, the movement of lipid droplets in the *Arabidopsis* pollen tube was found to be dependent on the actomyosin system (Yang *et al.*, 2023), while interactions among five different organelles (endoplasmic reticulum, Golgi

apparatus, lysosome, peroxisome, mitochondria) and lipid droplets were described as changeable over time (Valm *et al.*, 2017; Tikhomirova *et al.*, 2022).

The bulb epidermal cells of the onion constitute a single layer that acts as a protective skin, and effectively separates the thick and juicy scaly leaves. For decades, it has been used for cytological studies, mutagenesis and chromosomal analysis due to their simple and transparent structure, which has contributed to knowledge about the general anatomy of plant cells and the arrangement of organelles (Melo *et al.*, 2024). The use of onion epidermis to characterize the dynamics of lipid droplets and for their purification dates back to the classic works of Yatsu *et al.* (1971), Allen (1981) and Allen and Brown (1988). These reports sought to know the cellular nature of lipid droplets and their relationship with cytoplasmic currents and cytoskeletal dynamics.

Oparka *et al.* (1990) conducted dehydration experiments by applying mannitol to onion epidermis and impermeable dyes, which fail to cross the cell membrane unless there is a hypertonic medium. Interestingly, osmotic stress induced endocytosis of vesicles loaded with dyes and rehydration re-established cytoplasmic currents. Then, the flow of dye-containing vesicles through extensions of the endoplasmic reticulum to the nuclear membrane was observed along with intracellular lipid droplets. These results indicate that osmotic stress is an important factor for the endocytic and exocytic processes that occur in plant cells and directly relate them to membrane flow among organelles and probably, to lipid droplet intracellular distribution.

In this work, the distribution and dynamics of lipid droplets in epidermal tissue of white onion and red onion bulbs were studied to understand their possible functions in plant cells. We found that the lipid droplets move inside membrane extensions, which target the nuclear membrane. BODIPY493/503 and Lugol staining allowed visualization of a wide membrane network that extends throughout the cell and distributes lipid droplets to the nucleus.

## Materials and methods

### Preparation of onion epidermal cell samples

In order to study the subcellular dynamics, epidermal samples of the onion (*Allium cepa*) bulb were used. White and red onion bulbs were purchased in a local market taking care that the material came from a recent harvest, which is evidenced by the turgor of the leaves that accompany the bulb and the presence of roots. The

bulbs were superficially washed with sterilized distilled water, until any soil residue or dirt is removed, the rest of the procedure is conducted in a laminar flow hood. With assistance of a sterile scalpel, squared sheets of epidermis of 1 cm x 1 cm were carefully obtained from the inner surface of the bulb scales and placed with the smooth (superficial) side down on a cleaned slide disinfected with 96% ethanol. 100  $\mu$ l of distilled water was applied to the sample to maintain adequate humidity, and a coverslip was carefully placed over the preparation with the help of fine-tipped tweezers and sealed with nail varnish. The preparations were analyzed by differential interference contrast (Nomarski) optics in a Leica DM500B microscope equipped with a digital camera.

For Lugol's Staining, the square sheets of epidermis were placed for 30 s in a Lugol's solution (1:2 w/w, iodine:potassium iodide) and rinsed twice with distilled water. Next, the epidermis preparations were mounted in water on coverslip and analyzed by Nomarski optics in a Leica DM500B microscope equipped with a digital camera.

### Confocal microscopy

For analysis of onion cells stained with BODIPY493/503, squared sheets of epidermis were placed in the staining solution (10  $\mu$ M BODIPY493/503) for 5 minutes, then the samples were rinsed twice with water and mounted on a coverslip with water. The fluorescence signal was analyzed in an Olympus FV1000 confocal microscope equipped with objective UPLFLN 40X and a digital camera at 488 wavelengths of excitation and the emission detected at SP 500-550 nm. Representative Z pictures were processed and obtained by the ImageJ2 software.

## Results

### Interaction of lipid droplets with the nuclear membrane in cells of the epidermis of the bulb of *Allium cepa* L

The nucleus harbors a double membrane, which contains nuclear pores that acts as gateways of macromolecular exchange between the nucleoplasm and cytoplasm and is by far the most prominent organelle in onion epidermal cells (Meier *et al.*, 2017). We analyzed the intracellular distribution of lipid droplets and its organellar distribution using fresh preparations of white onion and red onion by differential interference contrast (DIC) microscopy. **Figure 1** shows observations of white onion under different tissue magnification. In **Figure 1a** the different rows of cells that make up the epidermis can

be seen, with the nucleus as the most visible organelle and the cell walls that delimit the rows. **In Figure 1b-d** there are gradual magnifications of the nucleus area, denoting the presence of a membrane network that extends throughout the cytoplasm and carries mobile lipid droplets. **Figures 1c, d** distinguish the membrane connections between the outer part of the nucleus and finger-shaped connections carrying the moving vesicles, we were able to corroborate that the vesicles enter and leave the nucleus through a very dynamic flow through real-time videos (data not shown).

### Cytological observations of lipid droplets in red onion epidermal cells

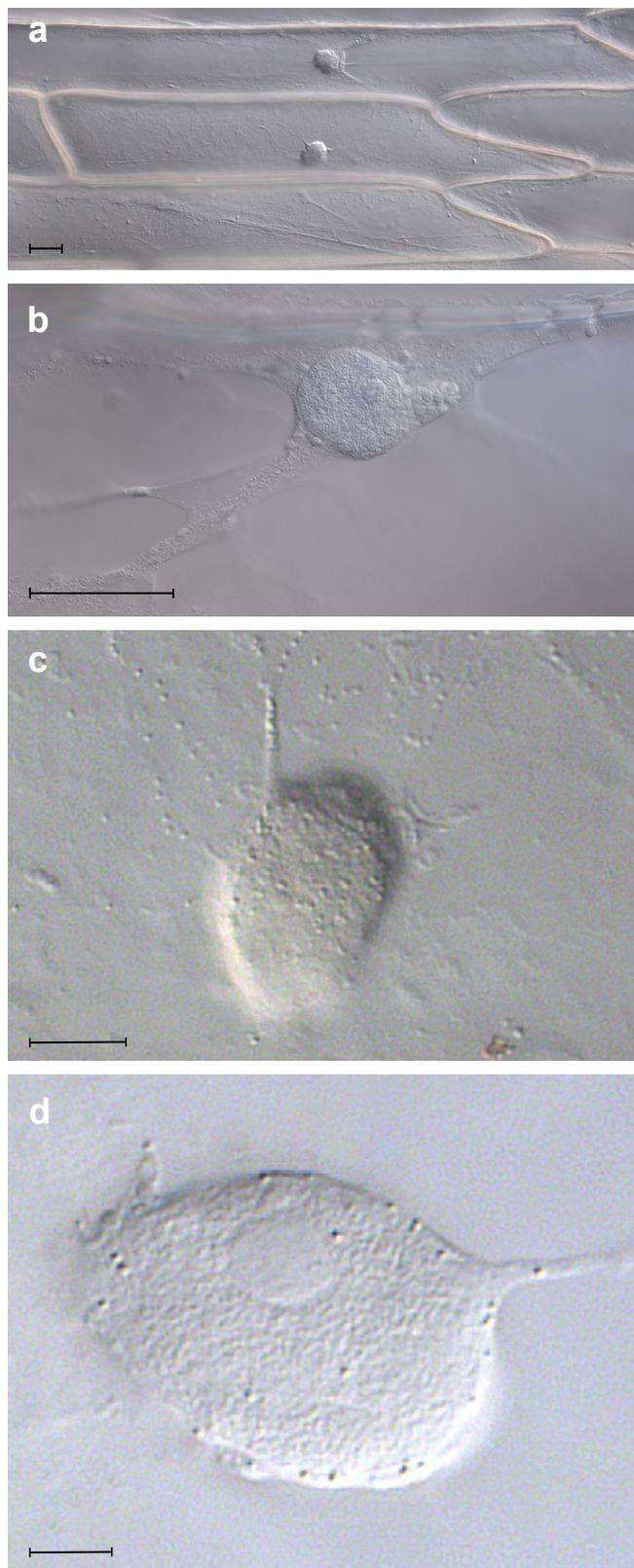
There are several varieties of onions, each with unique properties and characteristics that influence its flavor, texture, and size (Theshika *et al.*, 2019; Hao *et al.*, 2023). The red onion owes its color to the presence of anthocyanins, water-soluble pigments found in the cytoplasm. It was of interest to analyze if the interactions of lipid droplets with nuclei observed in white onion could be also present in red onion. Thus, fresh preparations of red onion epidermis were made and analyzed by DIC microscopy to detect the presence of lipid droplets. **In Figure 2a-c** micrographs are presented at different magnifications, the remarkable contrast presented by the purple color in the preparations allowed us to observe interactions among the nucleus, the plasma membrane and plasmodesmata and the presence of lipid droplets within the neighboring cells. Again, it can be seen that these lipid vesicles are not isolated but distributed along membranous extensions that approach the plasma membrane (**Figure 2c** inset).

Close up of nuclei in both onion varieties (**Figure 3**), clearly shows the distribution of lipid droplets in the periphery of the nuclear membrane.

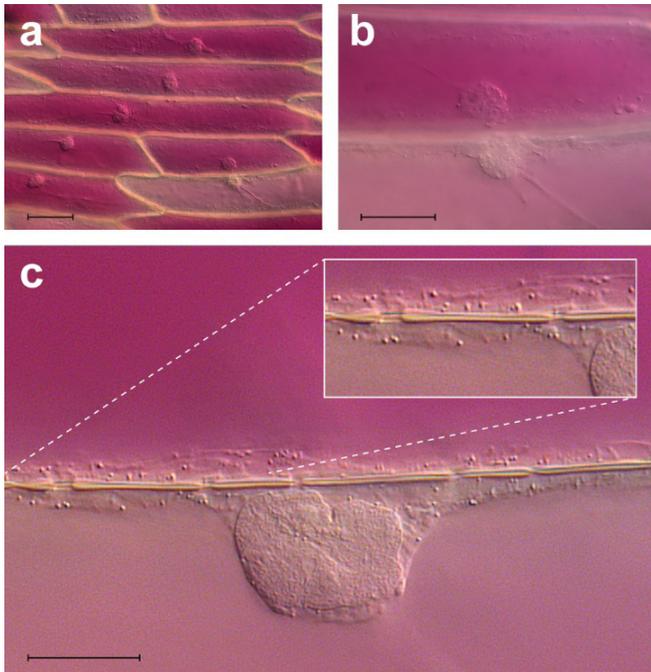
### Detection of lipid droplets in white onion epidermis by BODIPY493/503

BODIPY493/503 (4,4-difluoro-1,3,5,7,8-pentamethyl-4-bora-3a,4a-diaza-s-indacene) is a dye commonly used for cytological studies to visualize lipid droplets in both animal and plant cells. Thanks to its nonpolar structure, fluorescence and long-wavelength absorption, this dye allows the detection of nonpolar lipids and oils by confocal microscopy (Qiu and Simon, 2016).

Sections of white onion epidermis were obtained, and treated with BODIPY493/503 prior to observation by confocal microscopy. With this procedure, it was possible to identify the lipidic nature of a large number of vesicles with green fluorescence associated with membranous



**Figure 1.** Lipid droplets in white onion bulb epidermal cells. The images were taken at different magnifications and the membrane extensions that carry lipid droplets to the nuclear membrane are observed. Scale bars: 50  $\mu\text{m}$  (**a, b**), 25  $\mu\text{m}$  (**c**), and 10  $\mu\text{m}$  (**d**). Images were taken with a Leica DM5000B microscope under Nomarski optics.

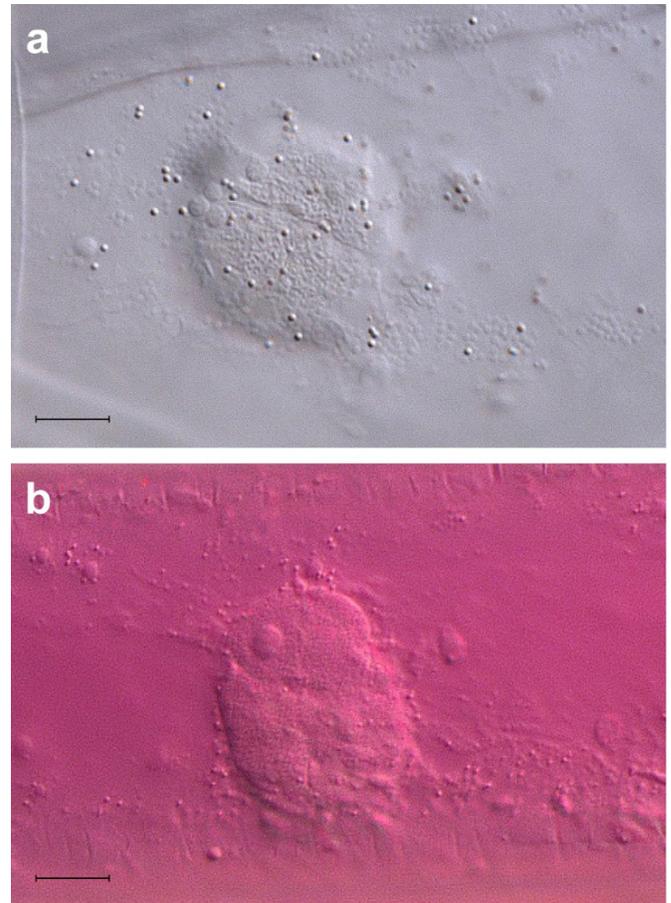


**Figure 2. Lipid droplets in epidermal cells of red onion bulb.** The images were taken at different magnifications and the extensions of the nucleus positioned at the edge of the cell are observed, which carry lipid droplets. Plasmodesmata are also observed in panel c inset. Scale bars: 100  $\mu\text{m}$  (a), 50  $\mu\text{m}$  (b), and 25  $\mu\text{m}$  (c). Images were taken with a Leica DM5000B microscope under Nomarski optics.

structures, mainly the nucleus and the surrounding cell membranes (Figure 4a). In our analyses, the lipid vesicles were detected in tight connection with the nuclei (Figure 4b). This information underscores the relevance that these small organelles may have for proper nucleus functioning.

#### Lugol staining of onion bulb epidermal cells

Lugol is a dye based on potassium iodide used as an indicator of the presence of animal glycogen or plant starch that stains the nucleus and reserve substances of cells and makes these structures more visible (Martín-Sánchez *et al.*, 2013). Based on these properties, we stained segments of onion bulb epidermis with Lugol and made observations by DIC microscopy at different magnifications. The micrographs show the extensive network of membrane connections that exist between the nucleus and the rest of the cell, which occupy most of the cell volume (Figure 5a). The most observable structure is the nucleus (Figure 5b) and its faraway membrane extensions that contain the lipid droplets (Figure 5c). These results show the tight connection between the membranes of different organelles within the plant cell.

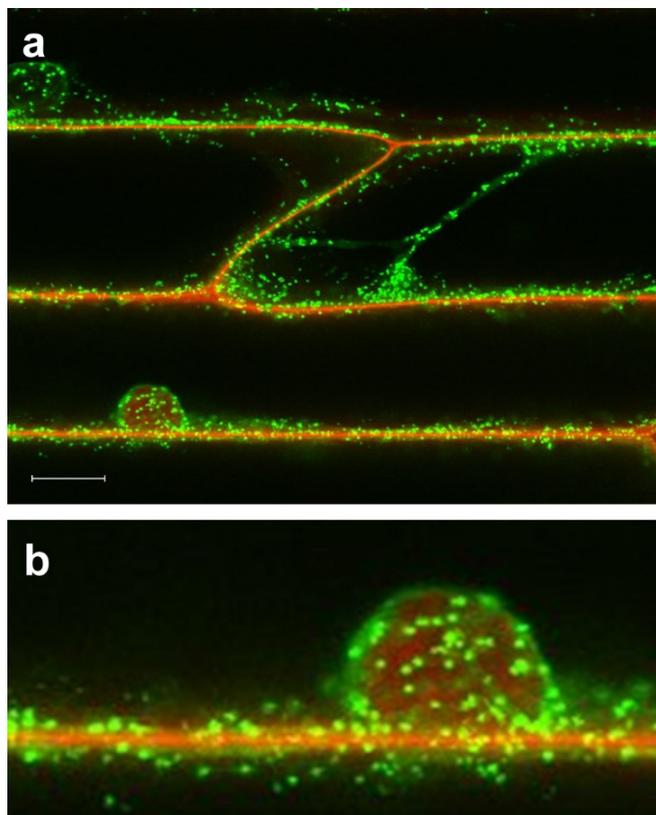


**Figure 3. Lipid droplets around nuclei in white and purple onion epidermal cells.** Representative images of white onion (a) and red onion (b) cells taken in a Leica DM5000B microscope under Nomarski optics. Scale bar: 10  $\mu\text{m}$ .

## Discussion

Lipid droplets have been identified in organisms of all kingdoms, including bacteria, yeasts, plants, animals, and humans (Olzmann and Carvalho 2019; Guzha *et al.* 2023; Fujimoto, 2024). In eukaryotic cells, their lipid content is delimited by membrane containing specific proteins, responsible for at least three fundamental functions: 1) The use of lipids contained in the vesicles as energy reserves, 2) membrane recovery from injury, and 3) communication between organelles to deliver specific proteins and lipids.

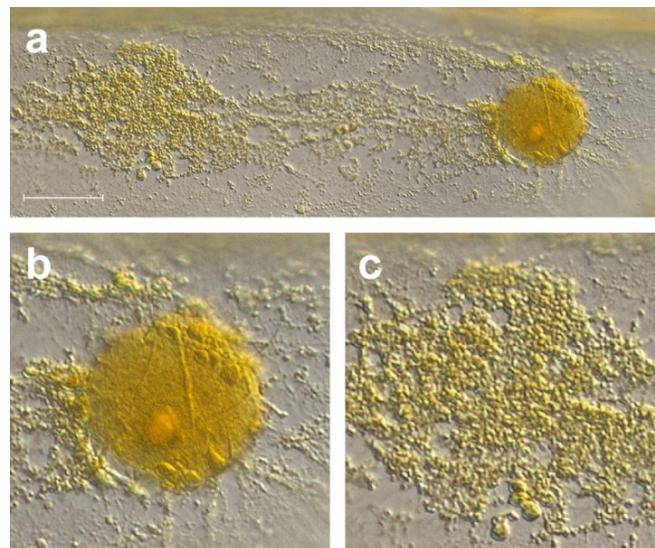
In angiosperms, an essential function of the reserves present in the seed is to provide energy to the embryo for post-germinative growth until the seedling can start photosynthesis. These stores consist of proteins, carbohydrates, and storage lipids (Li *et al.*, 2006; Quettier and Eastmond, 2009). Onion bulb cells are primarily a specialized type of storage cells, and we can argue that the function of lipid droplets within it is to act as energetic reserves, but we cannot exclude



**Figure 4. Detection of lipid droplets in cells of the epidermis of white onion by confocal microscopy using BODIPY493/503 staining.** Representative micrograph showing the lipid droplets emitting a green fluorescence in onion epidermal cells and are mainly associated with membranous structures (a). Close up of the cell with visible nucleus (b). Scale bar: 50  $\mu$ m.

additional roles owing the very dynamic movements within membrane extensions along the cell.

The main storage lipids that accumulate in the lipid droplets are triacylglycerols (TAGs), which in the cotyledons of mature embryos of *Arabidopsis thaliana* occupy approximately 60% of the cell volume (Baud *et al.*, 2008). After germination, TAGs are hydrolyzed to release free fatty acids (FAs) and glycerol. Lipases have been purified from the seeds of different plant species and there is physiological evidence of their role in the mobilization of TAG, also known as lipolysis (Kawinsky *et al.*, 2021; Wleklik *et al.*, 2023). Eastmond (2006) conducted genetic analyses in *Arabidopsis* for the identification of mutants altered in TAG mobilization, which do not develop in the absence of an exogenous carbon source, and fail to grow normally without sucrose supply. The affected mutants were called *sugar dependent* (*sdp*) and define lipases necessary for the breakdown of storage lipids. Noteworthy, SDP1 lipase is located on the surface of the lipid droplets, being transported to the vesicles from the peroxisomes through extensions of

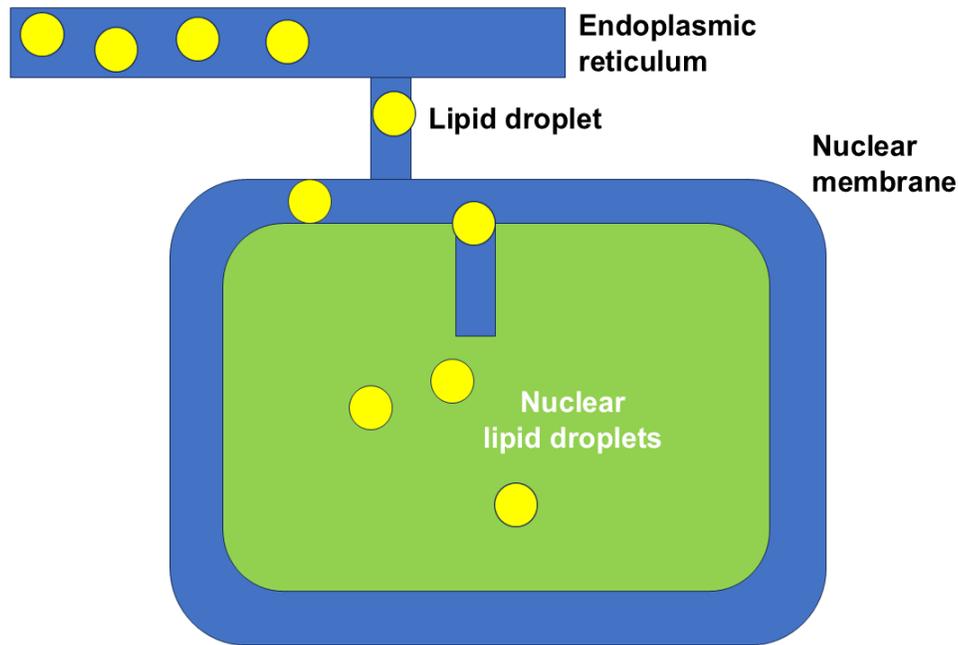


**Figure 5. White onion cell staining with Lugol.** Representative photograph showing the nucleus and their membranous connections (a). Close up images of the nucleus (b) and distal membranes with lipid droplets (c). Scale bar: 25  $\mu$ m.

their own membrane (Thazar-Poulot *et al.*, 2015). The phenotype of *sdp* mutants shows the important role of lipid metabolism and lipid droplet turnover for proper plant growth.

Taking our data together, we provide a schematic model for lipid droplet delivery into the onion cell nucleus (Figure 6). It denotes the presence of lipid droplets moving within membrane extensions that connect the nuclear membrane, probably to deliver lipids to the nucleus for the maintenance of the wide membrane network that composes it and their neighbor organelles. An additional function could be the supply of nuclear proteins, such as histones, nuclear pore proteins, and components for the processing of genetic material, which has been reported for lipid droplets in animal cells (Cho *et al.*, 2007; Gao and Goodman, 2015; Kumanski *et al.*, 2021).

Application of the dye BODIPY493/503 to samples of onion epidermis allowed the visualization of the vesicles that emit a green fluorescence, which we were able to detect by confocal microscopy. The numerous lipid droplets were found inside membrane compartments interacting with nuclei. On the other hand, images of the cells stained with Lugol allowed us to observe a wide membrane network, through which such vesicles move through the different organelles. The formation of membranous systems and the communication among them is vital for various functions in eukaryotic cells. Integrity of membranous system depends on the inter-organellar movement of lipid droplets promoted by cytoplasmic currents, the configuration of the endoplasmic reticulum



**Figure 6.** Transport of lipid droplets from the endoplasmic reticulum (ER) to the nucleus. The lipid droplets are produced within ER domains and can move over long distances inside membrane compartments that fuse with the nuclear membrane.

(ER) and the cytoskeleton (Tikhomirova *et al.*, 2022). Depending on developmental stage and physiological state of the plant, lipid droplets can be present either in seeds or vegetative tissues such as roots, leaves, dormant buds and pollen grains and an important function can be the protection of organelles to environmental injury such as heat, which induces the production of reactive oxygen species and membrane lipid peroxidation (Bouchnak *et al.*, 2023). Understanding the specific functions of lipid droplets in eukaryotic cells should consider organelle interactions and in particular, the nucleus. A major challenge is to understand how its movement and organelle interactions is influenced by age as well as biotic and abiotic stress, which disturb the microtubule network.

## Acknowledgments

We thank the Consejo de la Investigación Científica, UMSNH, grant 2.26, for financial support. We appreciate the support of Prof. Kent Chapman for useful discussions on the topic of lipid droplets and his suggestion to perform BODIPY493/503 staining.

## References

Allen NS (1981). Filamentous networks and particle movements in some plant cells. *J Cell Biol.* 302a.

Allen NS, Brown DT (1988). Dynamics of the endoplasmic

reticulum in living onion epidermal cells in relation to microtubules, microfilaments and intracellular particle movement. *Cell Mot Cyt.* 10:153-163.

Baud S, Dubreucq B, Miquel M, Rochat C, Lepiniec L (2008). Storage reserve accumulation in *Arabidopsis*: metabolic and developmental control of seed filling. *Arabidopsis Book.* 6:e0113.

Bouchnak I, Coulon D, Salis V, D'Andréa S, Bréhélin C (2023). Lipid droplets are versatile organelles involved in plant development and plant response to environmental changes. *Front Plant Sci.* 14:1193905.

Chen J, Doyle C, Qi X, Zheng H (2012). The endoplasmic reticulum: a social network in plant cells. *J Integr Plant Biol.* 54:840-50.

Cho SY, Shin ES, Park PJ, Shin DW, Chang HK, Kim D, Lee HH, Lee JH, Kim SH, Song MJ, Chang IS, Lee OS, Lee TR (2007). Identification of mouse Prp19p as a lipid droplet-associated protein and its possible involvement in the biogenesis of lipid droplets. *J Biol Chem.* 282(4):2456-2465.

Dhiman R, Caesar S, Thiam AR, Schrul B (2020). Mechanisms of protein targeting to lipid droplets: A unified cell biological and biophysical perspective. *Semin Cell Dev Biol.* 108:4-13.

Eastmond PJ (2006). SUGAR-DEPENDENT1 encodes a patatin domain triacylglycerol lipase that initiates storage oil breakdown in germinating *Arabidopsis* seeds. *Plant Cell.* 18(3):665-675.

Exner T, Romero-Brey I, Yifrach E, Rivera-Monroy J, Schrul B, Zouboulis CC, Stremmel W, Honsho M, Bartenschlager R, Zalckvar E, Poppelreuther M, Füllekrug J (2019). An alternative membrane topology permits lipid droplet localization of peroxisomal fatty acyl-CoA reductase 1. *J Cell Sci.* 132(6):jcs223016.

- Fujimoto T, Parton RG (2011). Not just fat: the structure and function of the lipid droplet. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* 3(3):a004838.
- Fujimoto T (2024). Nuclear lipid droplet: Guardian of nuclear membrane lipid homeostasis? *Curr Opin Cell Biol.* 88:102370.
- Gao Q, Goodman JM (2015). The lipid droplet-a well-connected organelle. *Front Cell Dev Biol.* 3:49.
- Guzha A, Whitehead P, Ischebeck T, Chapman KD (2023). Lipid droplets: Packing hydrophobic molecules within the aqueous cytoplasm. *Annu Rev Plant Biol.* 74:195-223.
- Hao F, Liu X, Zhou B, Tian Z, Zhou L, Zong H, Qi J, He J, Zhang Y, Zeng P, Li Q, Wang K, Xia K, Guo X, Li L, Shao W, Zhang B, Li S, Yang H, Hui L, Chen W, Peng L, Liu F, Rong ZQ, Peng Y, Zhu W, McCallum JA, Li Z, Xu X, Yang H, Macknight RC, Wang W, Cai J (2023). Chromosome-level genomes of three key *Allium* crops and their trait evolution. *Nat Genet.* 55(11):1976-1986.
- Hamade S, Traver MS, Bartel B (2025). The atypical pectin methyltransferase family member PME31 promotes seedling lipid droplet utilization. *Plant Direct* 9(4):e70054.
- Hu J, Prinz WA, Rapoport TA (2011). Weaving the web of ER tubules. *Cell* 147:1226-1231. doi:10.1016/j.cell.2011.11.022.
- Kawiński A, Miklaszewska M, Stelter S, Głab B, Banaś A (2021). Lipases of germinating jojoba seeds efficiently hydrolyze triacylglycerols and wax esters and display wax ester-synthesizing activity. *BMC Plant Biol.* 21(1):50.
- Kriechbaumer V, Brandizzi F (2020). The plant endoplasmic reticulum: an organized chaos of tubules and sheets with multiple functions. *J Microsc.* 280:122-133.
- Kumanski S, Viart BT, Kossida S, Moriel-Carretero M (2021). Lipid droplets are a physiological nucleoporin reservoir. *Cells.* 10(2):472.
- Li Y, Beisson F, Pollard M, Ohlrogge J (2006). Oil content of Arabidopsis seeds: the influence of seed anatomy, light and plant-to-plant variation. *Phytochemistry.* 67(9):904-915.
- Meier I, Richards EJ, Evans DE (2017). Cell biology of the plant nucleus. *Annu Rev Plant Biol* 68:139-172.
- Melo EC, da Silva Pinheiro R, Costa BS, Lima RMT, Dias ACS, de Jesus Aguiar Dos Santos T, Nascimento MLLBD, de Castro E Sousa JM, Islam MT, de Carvalho Melo Cavalcante AA, El-Nashar HAS, El-Shazly M, Oliveira Filho JWG. 2024. *Allium cepa* as a toxicogenetic investigational tool for plant extracts: A systematic review. *Chem Biodivers.* 21(12):e202401406.
- Thazar-Poulot N, Miquel M, Fobis-Loisy I, Gaude T (2015). Peroxisome extensions deliver the Arabidopsis SDP1 lipase to oil bodies. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 112(13):4158-4163.
- Tikhomirova MS, Kadosh A, Saukko-Paavola AJ, Shemesh T, Klemm RW (2022). A role for endoplasmic reticulum dynamics in the cellular distribution of microtubules. *Proc Natl Acad Sci USA.* 119(15):e2104309119. doi:10.1073/pnas.2104309119.
- Olzmann JA, Carvalho P (2019). Dynamics and functions of lipid droplets. *Nat Rev Mol Cell Biol* 20:137-155.
- Oparka KJ, Prior DA, Harris N (1990). Osmotic induction of fluid-phase endocytosis in onion epidermal cells. *Planta.* 180:555-61.
- Quader H, Schnepf E (1986). Endoplasmic reticulum and cytoplasmic streaming: fluorescence microscopical observations in adaxial epidermis cells of onion bulb scales. *Protoplasma* 131:250-252.
- Qiu B, Simon MC (2016). BODIPY 493/503 staining of neutral lipid droplets for microscopy and quantification by flow cytometry. *Bio Protoc.* 6(17):e1912.
- Quettier AL, Eastmond PJ (2009). Storage oil hydrolysis during early seedling growth. *Plant Physiol Biochem.* 47(6):485-490.
- Stephenson RA, Thomalla JM, Chen L, Kolkhof P, White RP, Beller M, Welte MA (2021). Sequestration to lipid droplets promotes histone availability by preventing turnover of excess histones. *Development* 148(15):dev199381.
- Teshika JD, Zakariyyah AM, Zaynab T, Zengin G, Rengasamy KR, Pandian SK, Fawzi MM (2019). Traditional and modern uses of onion bulb (*Allium cepa* L.): a systematic review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 59(sup1):S39-S70.
- Thazar-Poulot N, Miquel M, Fobis-Loisy I, Gaude T (2015). Peroxisome extensions deliver the Arabidopsis SDP1 lipase to oil bodies. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 112(13):4158-4163.
- Valm AM, Cohen S, Legant WR, Melunis J, Hershberg U, Wait E, Cohen AR, Davidson MW, Betzig E, Lippincott-Schwartz J (2017). Applying systems-level spectral imaging and analysis to reveal the organelle interactome. *Nature* 546:162-167.
- Wleklík K, Stefaniak S, Nuc K, Pietrowska-Borek M, Borek S (2023). Identification and potential participation of lipases in autophagic body degradation in embryonic axes of lupin (*Lupinus* spp.) germinating seeds. *Int J Mol Sci.* 25(1):90.
- Wright ZJ, Tharp NE, Bartel B (2025). ER nests are specialized ER subdomains in Arabidopsis where peroxisomes and lipid droplets form. *Dev Cell.* 25:S1534-5807(25)00152-2.
- Yang L, Liu J, Wong CK, Lim BL (2023). Movement of lipid droplets in the Arabidopsis pollen tube is dependent on the actomyosin system. *Plants (Basel).* 12(13):2489. doi:10.3390/plants12132489.
- Yatsu LY, Jacks TJ, Hensarling TP (1971). Isolation of spherosomes (oleosomes) from onion, cabbage, and cottonseed tissues. *Plant Physiol.* 48(6):675-82.



# Jasmonic acid induces trichome formation in *Arabidopsis* leaves via the receptor CORONATINE INSENSITIVE 1, and crosstalk with specific auxin signaling components and cell patterning genes

Javier Raya González<sup>1</sup> , Aarón Munguía Rodríguez<sup>2</sup>, José López Bucio<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio B3, Ciudad Universitaria; 58030, Morelia, Michoacán, México.

## Dates

Received: 7 February 2025

Accepted: 30 May 2025

Published: August 2025

## \*Corresponding author

Javier Raya González

[javier.raya@umich.mx](mailto:javier.raya@umich.mx)

ORCID: 0000-0002-6685-5090

## Abstract

Trichomes are leaf epidermal cells with important adaptive functions and represent useful systems for studying cell fate determination. Jasmonic acid (JA) and auxin (indole-3-acetic acid; IAA) share signaling elements that influence growth and development, but their roles in epidermal cell differentiation in leaves have been scarcely investigated. In this work, we show that trichome formation was stimulated in a JA concentration-dependent manner in leaves of *Arabidopsis* seedlings, but not in JA resistant *coi1-1* mutants defective on the JA receptor CORONATINE INSENSITIVE 1, or in auxin signaling double mutant *arf7/arf19* or cell specification mutants *gl2* and *rhd6*. Noteworthy, jasmonic acid-related mutants *jar1* and *axr1-3* as well as the triple mutant *tir1/afb2/afb3* defective in auxin receptors and *slr1*, displayed normal responses to trichome formation induced by jasmonic acid. Our results indicate that the jasmonic acid receptor CORONATINE INSENSITIVE 1 mediates leaf epidermal cell differentiation likely acting in concert with ARF7 and ARF19, GL2 and RHD6 transcription factors.

**Keywords:** *Arabidopsis thaliana*, differentiation, trichomes, jasmonic acid, auxin.

## Introduction

Trichomes are differentiated epidermal cells from the aerial part of plants such as leaves, stems, and flowers (Wagner *et al.*, 2004; Kabir *et al.*, 2024). Trichomes can be single-celled or multicellular, branched or unbranched, and glandular secretory or non-glandular; characteristics often used for species identification (Hauser, 2014). Trichomes assist seed dispersal and function as barriers to protect plants against herbivores and insect attack, fungal infection, parasitic plants, UV radiation, and modulate transpiration (Wagner *et al.*, 2004; Ishida *et al.*, 2008; Runyon *et al.*, 2010).

In *Arabidopsis*, trichomes are unicellular structures that can be either unbranched or have two to five branches (Mathur and Chua, 2000; Schnittger and Hülskamp, 2002). The genetic mechanisms for trichome formation involve the R2R3 MYB/basic helix-loop-helix (bHLH)/WD40 (MBW) complex that includes GLABRA1 (GL1), MYB23, MYB5 and WEREWOLF (WER), required for differentiation of shoot or root epidermal cells (Pesch *et al.*, 2015). The MBW complex transcriptionally activates, among other downstream

genes, the homeodomain transcription factor *GLABRA2* (*GL2*) for trichome and root hair differentiation (Rerie *et al.*, 1994; Di Cristina *et al.*, 1996; Masucci *et al.*, 1996; Hung *et al.*, 1998). *GL1* acts specifically in trichome patterning, whereas *WER* modulates root hair patterning, *MYB23* works redundantly in both trichome and root hair patterning, and *MYB25* regulates mucilage synthesis, seed coat development and trichome morphogenesis (Lee and Schiefelbein, 1999; Kirik *et al.*, 2001; 2005; Li *et al.*, 2009). However, additional genetic components have been involved in root hair formation and development, including the transcription factors *ROOT HAIR DEFECTIVE 6* (*RHD6*) and *CAPRICE* (*CPC*) (Wada *et al.*, 1997; Menand *et al.*, 2007). *CPC* moves into trichoblast cells to establish cell identity, through a positive regulation of *RHD6*, which is critical for root hair emergence (Menand *et al.*, 2007). *Arabidopsis* mutants affected in *CPC* or *RHD6* are defective in root hair number or emergence, respectively, indicating their essential role in epidermal cell patterning.

Jasmonic acid (JA) and indole-3-acetic acid (IAA) are two important phytohormones that interact in various

developmental processes such as seed germination, root growth, senescence, lateral root formation, and epidermal cell differentiation (Raya-González *et al.*, 2012; Wasternack and Hause, 2013; Pérez-Alonso *et al.*, 2021). Several proteins involved in jasmonate biosynthesis or signaling have been isolated and characterized including the CORONATINE INSENSITIVE1 (COI1), JASMONIC ACID RESISTANT1 (JAR1), and AUXIN RESISTANT1 (AXR1) (Wasternack and Hause, 2013; Browse, 2009; Mittal *et al.*, 2024). Among these, JAR1 conjugates JA to isoleucine forming the bioactive (+)-7-iso-JA-Ile that is perceived by COI1, acting as a jasmonate receptor (Yan *et al.*, 2009; Mittal *et al.*, 2024). The function of AXR1 in both JA and IAA signaling indicates that these regulators interact in modulating developmental processes (Tiryaki and Staswick, 2002), but its possible commonalities orchestrating trichome formation remain to be investigated.

In the present work, we tested the effects of JA on trichome formation on leaves of *Arabidopsis* seedlings. We show that JA increases trichome density in a dose-dependent manner and analyzed this process in a variety of *Arabidopsis* mutants defective in JA and auxin signaling, and epidermal cell patterning. Our results show that COI1, but not JAR1 or AXR1, is involved in jasmonate-induced trichome formation. Indeed, genetic analysis demonstrated that the ARF7 and ARF19 transcription factors, previously involved in the formation of lateral roots in response to auxin, directly or indirectly crosstalk with GL2 and RHD6 to orchestrate trichome development in *Arabidopsis* leaves.

## Materials and methods

### Biological material and growth conditions

For the different experimental designs, *Arabidopsis thaliana* seeds from Columbia (Col-0) and Wassilewskija (Ws) ecotypes were used, as well as mutants resistant to JA, *coi1-1* (Feys *et al.*, 1994), *jar1-1* (Staswick and Tiryaki, 2004) and *axr1-3* (Lincoln *et al.*, 1990), mutants defective in auxin signaling, *tir1/afb2/afb3* (Parry *et al.*, 2009), *arf7/arf19* (Wilmoth *et al.*, 2005), *slr1-1* (Fukaki *et al.*, 2002), mutants affected in epidermal cell differentiation *cpc* (Wada *et al.*, 1997), *rhd6* (Masucci and Schiefelbein, 1994), *gl2* (Rerie *et al.*, 1994) and its respective reporter construct *GL2:uidA* (Masucci *et al.*, 1996). Seeds were surface sterilized by placing them in Eppendorf tubes, where 95% (v/v) ethanol was added and shaking applied for 5 min. Ethanol was then removed and 20% (v/v) bleach was added for 7

min. Subsequently, bleach was removed and 5 washes were performed with sterile distilled water, seeds were incubated in darkness at 4 °C for 48 h.

The disinfected seeds were germinated and grown under sterile conditions on agar plates containing 0.2x MS salts (Murashige and Skoog, 1962) supplemented with sucrose 0.6% (w/v), phytagar 1% (w/v) and pH adjusted to 7. Plates were placed vertically at an angle of 65° in a growth chamber (Percival AR-95L) under controlled photoperiod of 16 h of light and 8 h of darkness, light intensity of 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , temperature of 22 °C and 80% humidity. JA was dissolved in ethanol and added to the media at the required concentrations. In control treatments, the solvent was supplied to the medium in a volume equivalent to the highest concentration of JA tested in the bioassay. MS basal salts mixture and JA were acquired from Sigma-Aldrich, while Phytagar, which was used to solidify the media, was purchased from PhytoTechnology.

For *coi1-1* mutant selection, seeds from a *coi1-1/COI1* segregating population were screened for normal primary root growth in agar solidified 0.2x MS medium supplemented with 4  $\mu\text{M}$  JA. Putative JA resistant mutants with long primary roots were selected and transferred to plates with different treatments to analyze trichome development.

### Trichome measurements

*Arabidopsis* trichomes were analyzed using a stereoscopic microscope (Leica, MZ6/L2), at 2X objective. The images were captured using a SAMSUNG SCC 131-A digital camera adapted to the microscope. To determine trichome density in wild-type and mutant seedlings under control conditions and in response to JA, Image J software was used to indicate an area of 1 mm<sup>2</sup> on the leaf surface, and the number of trichomes within the area was quantified. Trichome quantification was performed on the second true leaf of *Arabidopsis* 12 days after germination. For all experiments with wild-type and mutant lines, data were statistically analyzed using the STATISTICA 10 program (Dell StatSoft, Austin, Texas, USA). Univariate and multivariate analysis with a Tukey's post hoc test were performed. Different letters were used to indicate means with significant difference (P <0.05).

### Histochemical analysis

For  $\beta$ -glucuronidase activity analysis, transgenic *Arabidopsis* seedlings expressing the *GL2:uidA* marker (Szymanski *et al.*, 1998) were incubated overnight at 37 °C in a micro-plate with 0.1% X-Gluc (5-bromo-4-chloro-

3-indol  $\beta$ -D-glucuronide) dissolved in a phosphate buffer ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  and  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 0.1 M, pH 7) with the addition of 2 mM potassium ferrocyanide and 2 mM potassium ferricyanide. For tissue clearing, X-Gluc solution was removed and seedlings were incubated 60 min at 62 °C with 0.24 N HCl in 20% methanol (v/v). The solution was substituted by 7% NaOH (w/v) in 60% ethanol (v/v) for 20 min at room temperature. Seedlings were dehydrated with ethanol treatments at 40%, 20% and 10% (v/v) for a 20 min period each, and fixed in 50% glycerol (v/v). A representative seedling was chosen for each treatment and photographed using the Leica CME microscope. For each treatment at least ten seedlings were analyzed.

## Results

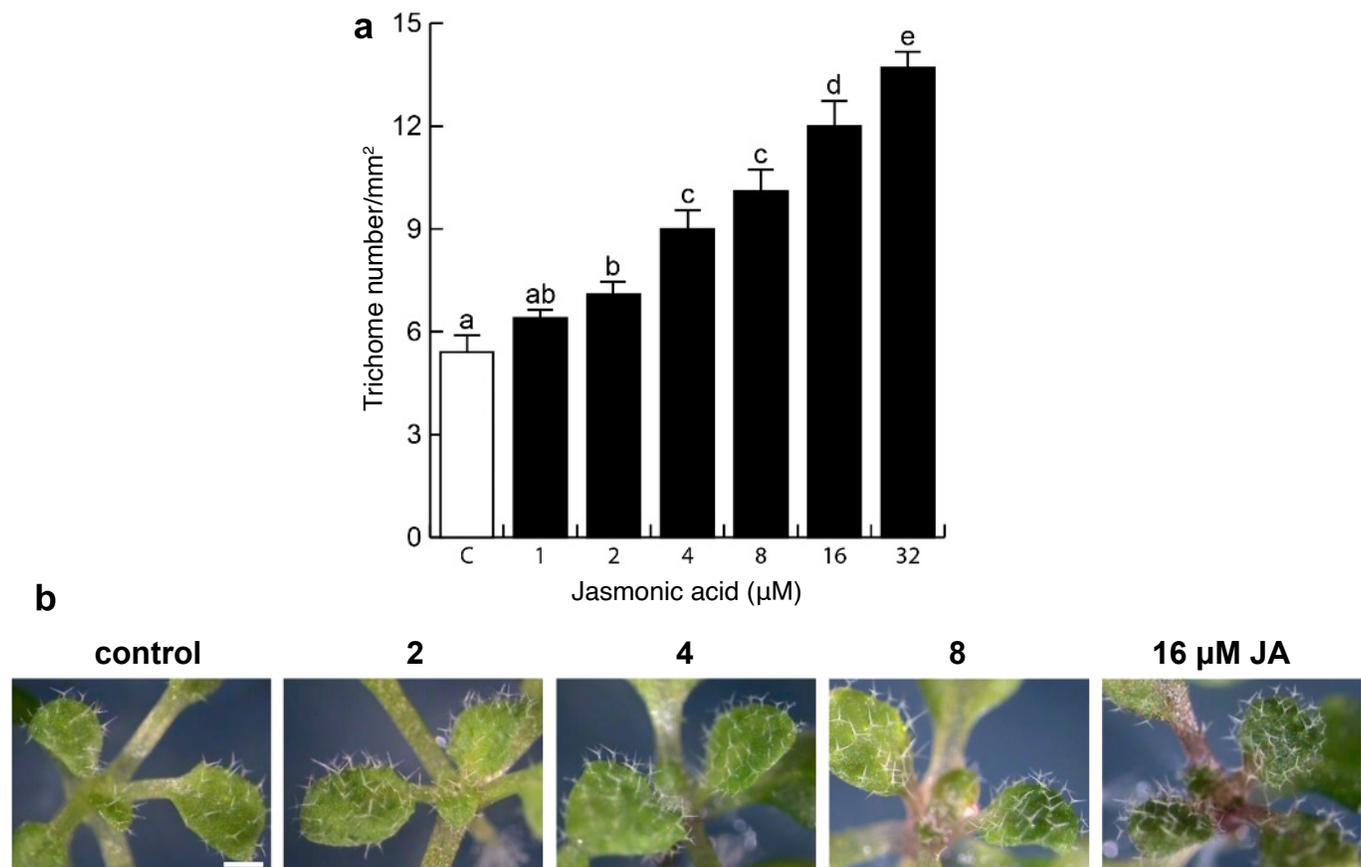
### Jasmonic acid induces trichome formation in *Arabidopsis*

Previous reports indicate that JA regulates trichome formation (Traw and Bergelson, 2003). However, to the

best of our knowledge, detailed information about the connection between JA and IAA in this developmental response is still lacking. The effects of JA on leaf trichome patterning were analyzed in *Arabidopsis* (Col-0) seedlings, which were germinated and grown on agar-solidified Petri plates supplied with 0.2x MS medium in the presence of the solvent (control) or increasing concentrations of JA. **Figure 1** shows that JA increases trichome density in a concentration-dependent manner, stimulating up to twice its numbers in JA concentrations of 16 and 32  $\mu\text{M}$  (**Figure 1a**). Besides increasing trichome number, JA slightly induced anthocyanin production on leaves, particularly at the highest concentrations tested (**Figure 1b**). These results indicate that JA modulates cell differentiation in leaf epidermal cells.

### The *coil-1* mutant is insensitive to jasmonic acid effects in trichome formation

The *CORONATINE INSENSITIVE1* (*COI1*) gene encodes for a jasmonate receptor (Katsir *et al.*, 2008). To understand the involvement of *COI1* receptor on



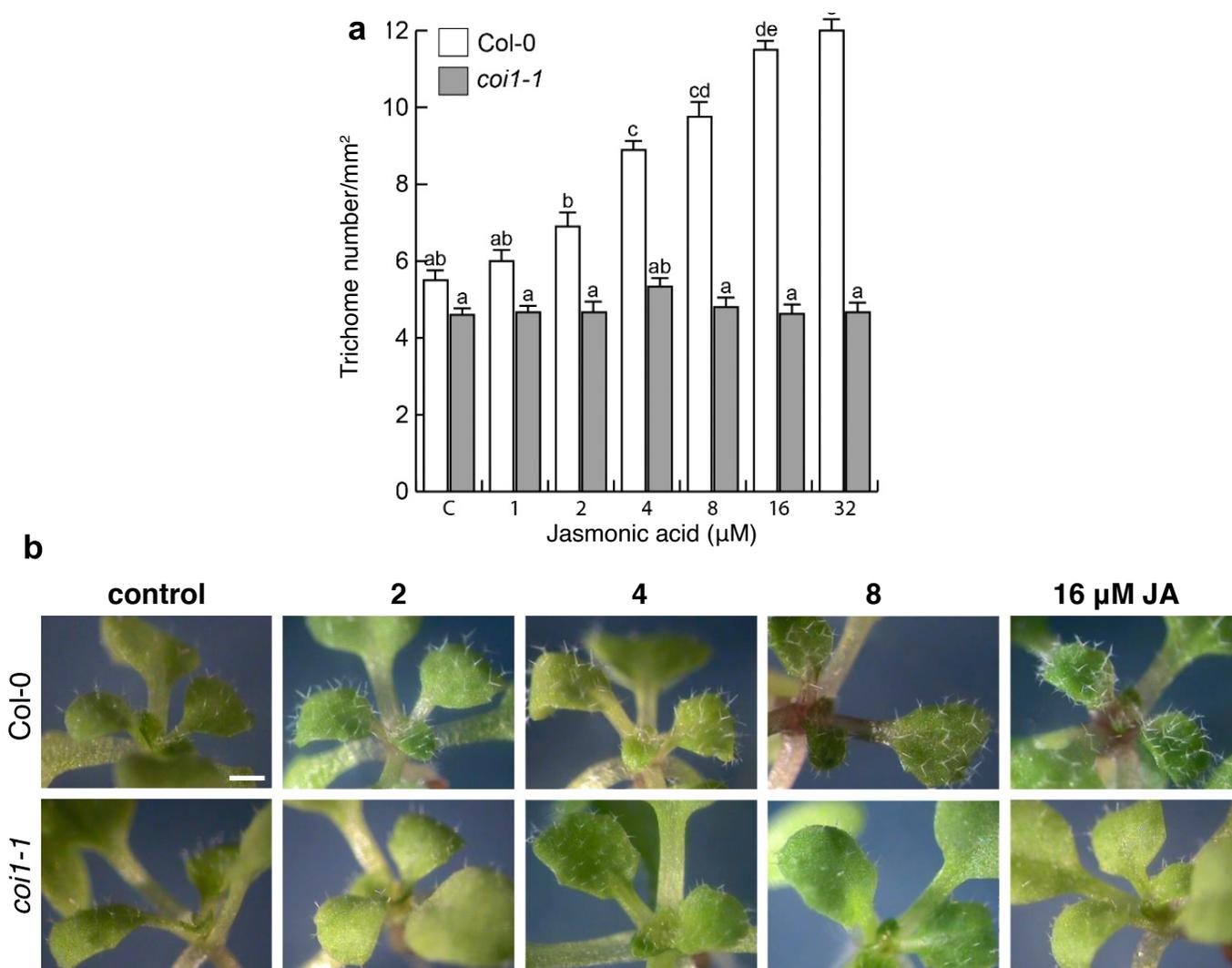
**Figure 1. Jasmonic acid promotes trichome formation in *Arabidopsis thaliana*.** (a) Trichome density in leaves from 12 day-old *Arabidopsis thaliana* seedlings treated with the solvent or increasing jasmonic acid concentrations. Trichome density was determined by counting the number of trichomes per  $\text{mm}^2$  of leaf surface ( $n = 10$ ). Bars indicate the means and standard errors. (b) Representative images of leaves from seedlings grown in the different treatments. Scale bar = 1 mm. The experiment was repeated three times with comparable results.

trichome formation, the effect of JA in wild-type and *coil-1* mutant seedlings was compared. Because *coil-1* mutant is infertile, homozygous mutant seeds are not available, we then performed a previous selection supplying 8  $\mu\text{M}$  JA and analyzing primary root growth in seedlings from a *coil-1/COII* segregating population, taking as main indicator the insensitivity of homozygous *coil* to JA on root growth (Feys *et al.*, 1994). Wild-type and *coil* seedlings were transferred to agar-solidified MS 0.2x medium supplied with the solvent, or increasing JA concentrations. When compared to the WT, *coil-1* mutants developed fewer trichomes in leaves in medium without JA. Indeed, the mutants were clearly

resistant to the application of JA on trichome formation and anthocyanin production (Figure 2a, b). These results indicate that JA requires COII to induce trichome formation in leaves.

### Jasmonic acid induces trichome formation independently of JAR1 and AXR1

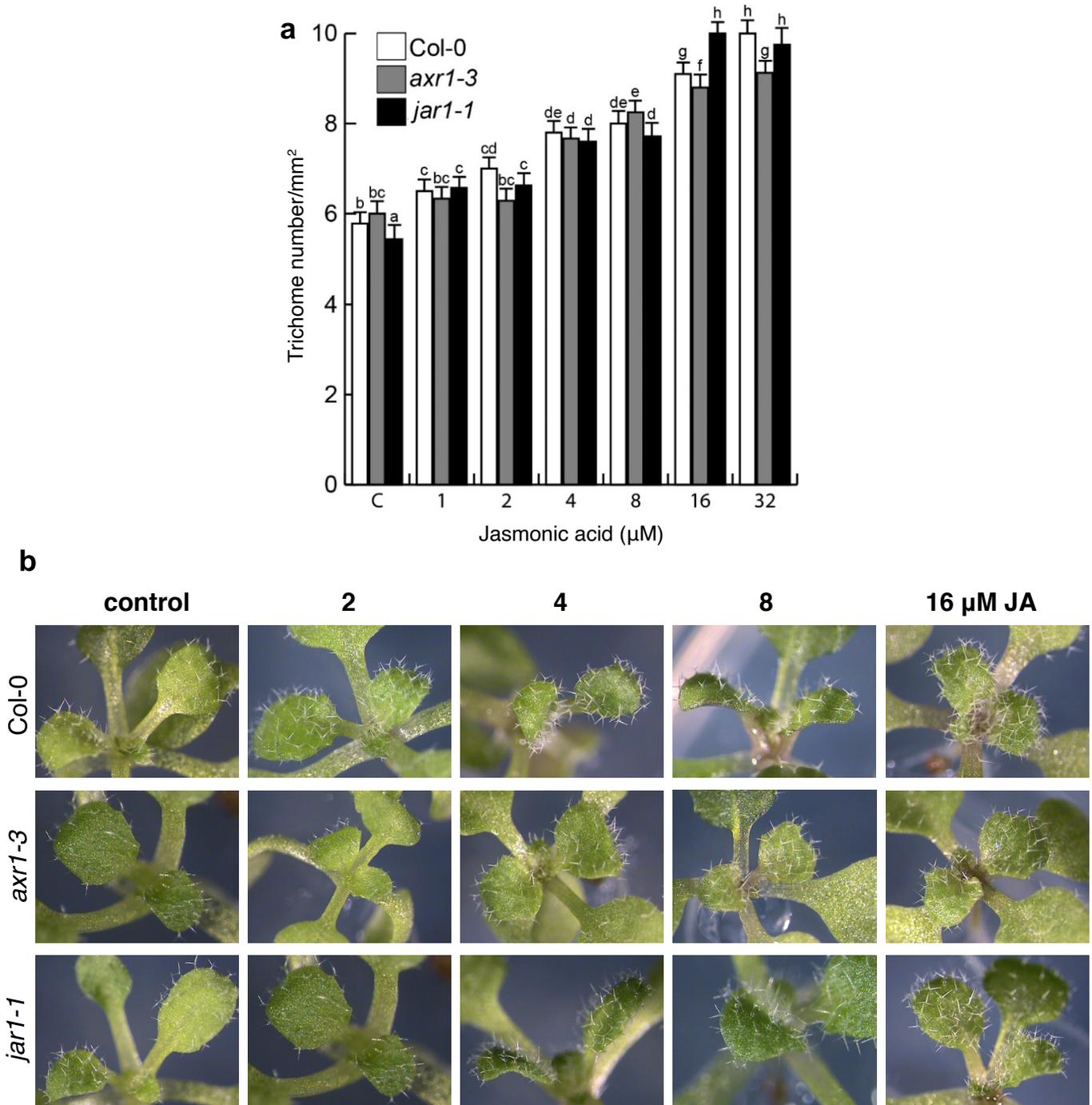
JA signaling involves the genetic components JAR1, which encodes an enzyme that conjugates JA to isoleucine forming JA-Ile (Staswick and Tiryaki, 2004) and AXR1, an *Arabidopsis* auxin-resistance gene, which encodes a protein related to ubiquitin-activating enzyme E1 (Leyser *et al.*, 1993). Initially, both genes were iden-



**Figure 2. The jasmonic acid receptor coronatine insensitive 1 (COII) mediates trichome response to jasmonic acid.** Wild-type seedlings (Col-0) were germinated and grown during 4 days in MS 0.2X medium and *coil-1* homozygous seedlings were selected from the segregating population *coil-1/COII* in medium supplemented with 4  $\mu\text{M}$  JA. Four day-old seedlings were transferred and grown side by side in MS 0.2X medium supplied with the solvent or different concentrations of jasmonic acid. 8 days after transfer, trichome density (a) was determined. Scale bar = 1 mm. (b) Representative images of leaves from wild-type and *coil-1* seedlings under different jasmonic acid treatments. The bars in (A) represent the means  $\pm$  standard error. The experiment was repeated three times with comparable results.

tified from mutants that are resistant to JA on primary root growth. However, there is poor knowledge about their participation in trichome formation in response to JA. Therefore, the responses of WT and JA signaling mutants *axr1-3* and *jar1-1* to the effect of JA on trichome formation were evaluated in leaves of plants 12 days after germination. It was found that both mu-

tant lines presented a similar response to the WT under control conditions and when supplied with increasing JA concentrations (Figure 3a, b). These results indicate that trichome formation in response to JA is specifically altered in *coi1* but not in other JA-related *Arabidopsis* mutants.



**Figure 3. Induction of trichomes by jasmonic acid occurs independently of the signaling elements JAR1 and AXR1.** (a) Trichome density per mm<sup>2</sup> on leaves of *Arabidopsis thaliana* seedlings. (b) Representative images of leaves from plants grown under varied jasmonic acid supplementation. Scale bar = 1 mm. The experiment was repeated twice with comparable results.

### AUXIN RESPONSE FACTORS 7 and 19 mediate jasmonic acid induction of trichomes

JA and IAA interact to orchestrate several developmental programs (Pérez-Alonso *et al.*, 2021). A possible interaction between JA signaling and IAA in trichome formation was determined at the genetic level by analyzing the responses of the WT and a battery of mutants defective in auxin perception and signaling including *tir1/afb2/afb3*, *arf7/arf19* and *slr1* in response to increasing JA supplementation. It was found that the *arf7/arf19* double mutant is resistant to JA promoting effect on trichome formation (Figure 4), whereas *tir1/afb2/afb3* and *slr1* undergo a comparable response to wild-type seedlings (Figure 4). These results imply ARF7 and ARF19 in JA-induced trichome formation and define a novel JA-IAA genetic interaction at the level of epidermal cell specification.

### Role of epidermal specification genes *GL2*, *RHD6* and *CPC* in trichome formation in response to jasmonic acid

The GL2 protein selectively regulates epidermal cell differentiation in *Arabidopsis*, acting as a positive regulator of trichome formation (Masucci *et al.*, 1994). To determine the possible participation of GL2 in JA-induced trichome formation, we evaluated the effect of JA on leaves of wild-type, transgenic *Arabidopsis* seedlings expressing the *GL2:uidA* marker, and *gl2* mutant seedlings. Trichome density was increased in a JA concentration-dependent manner in the WT (Figure 5a), which correlated with increased expression of *GL2:uidA* on these structures at the leaf epidermis as the JA concentration increased. On the other hand, under control conditions, *gl2* mutant seedlings lacked trichomes (Figure 5b), a phenotype not restored with JA application at low concentrations (1 and 4  $\mu\text{M}$ ). Moreover, at a high concentration of JA (16  $\mu\text{M}$ ), the formation of aberrant, unbranched trichomes was observed at leaf margins (Figure 5b). Thus, JA stimulates trichome formation and differentiation via GL2.

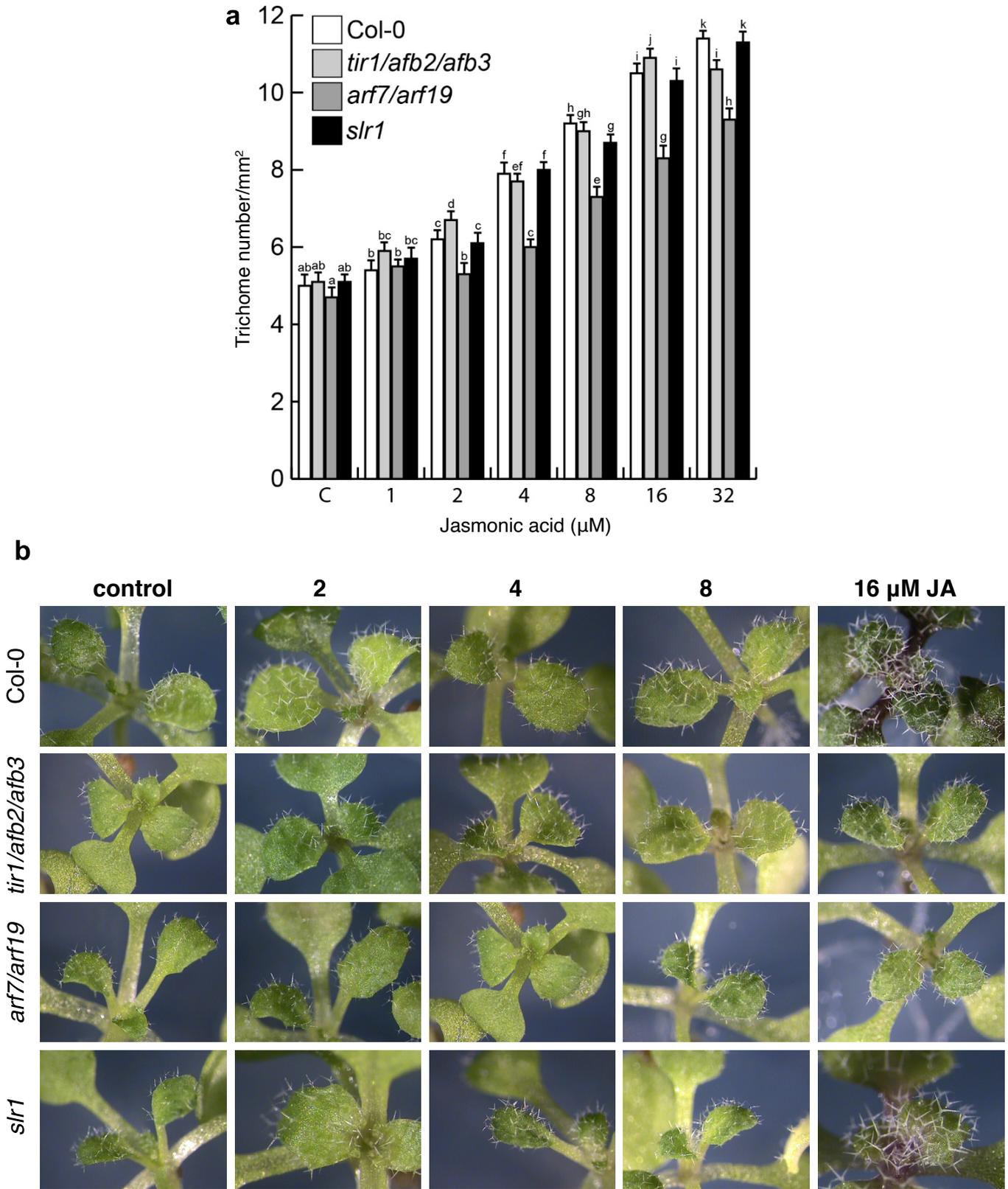
The *RHD6* and *CPC* play critical roles in root hair initiation and epidermal cell differentiation, however, their possible participation on trichome formation remains unknown (Shibata *et al.* 2019). We next decided to study the effect of JA on mutants affected in these genes. As in the WT (*Ws* ecotype), JA increased trichome density in *Arabidopsis cpc* mutants, being even more sensitive than the WT, since JA increased trichome density by about 20% in *cpc* compared to *Ws* seedlings (Figure 6). Interestingly, *rhd6* forms less trichomes than the WT with or without JA supplementation (Figure 6).

These results indicate that *RHD6* and *CPC* play opposite roles in JA-induced trichome formation.

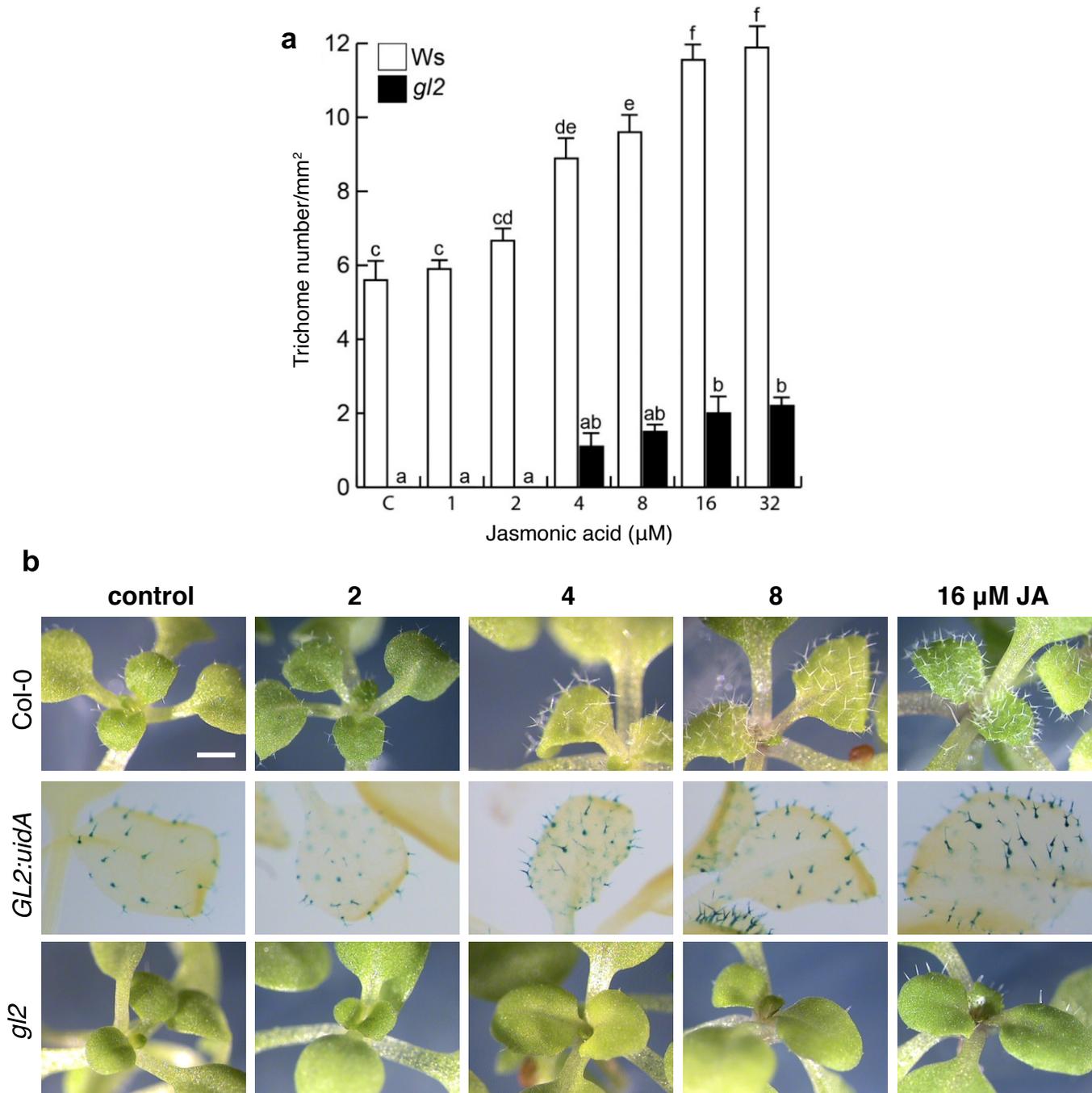
## Discussion

Trichomes are specialized leaf epidermal cells with relevant protective functions to biotic and abiotic stress. Here, we tested the possible crosstalk between auxin and jasmonic acid signaling in trichome formation in *Arabidopsis* leaves at the genetic level. JA supplementation to the growth medium promoted trichome formation in a dose-dependent manner, an effect coincident to that reported for foliar treatment with JA, or during the leaf wounding response, which increases trichome formation (Traw and Bergelson, 2003).

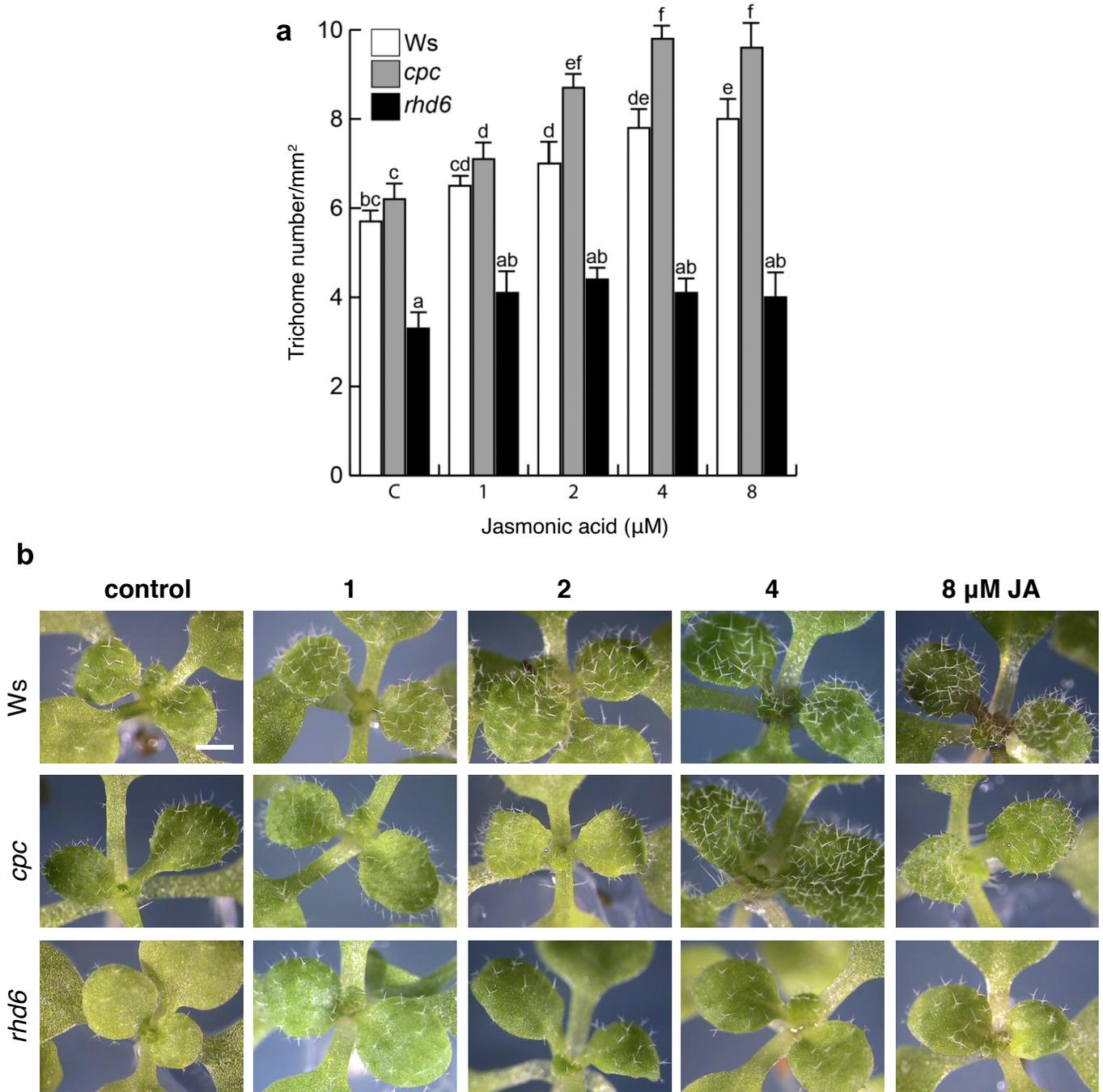
To determine whether trichome formation in response to JA is orchestrated via canonical components of the JA or IAA signaling pathways, we evaluated the effect of JA on WT *Arabidopsis* seedlings and selected mutants. The F-box protein COI1 acts as a JA receptor, which directly binds JA-Ile (Xie *et al.*, 1998; Yan *et al.*, 2009), while JAR1 is responsible for JA conjugation to isoleucine (Staswick and Tiryaki, 2004) and AXR1 is a subunit of the RUB1-activating enzyme that is necessary for protein degradation required for responses to either JA or IAA (Lincoln *et al.*, 1990). Quantification of trichome numbers in leaves from WT, *coi1-1*, *jar1-1* and *axr1-3*, showed that only *coi1-1* showed resistance to JA-induced trichome formation, which indicates that the formation of these epidermal structures requires the JA receptor COI1, but not the signaling elements JAR1 and AXR1, opening the possibility that other JA conjugates with lower activity may be responsible for trichome formation in those mutants since JAR1 mutation does not dismiss all JA-amino acid conjugates (Staswick and Tiryaki, 2004). These results are consistent with previous reports, which indicate that COI1 is a key component, whereas JAR1 and the JA-signaling transcription factor MYC2, are not involved in trichome formation in response to JA (Traw and Bergelson, 2003; Yoshida *et al.*, 2009). Interestingly, although AXR1 is not implicated in trichome formation, it has been considered a key player in trichome morphogenesis. Recently, Liu *et al.* 2023, isolated an *Arabidopsis* mutant named *aberrantly branched trichome3-1 (abt3-1)*, which showed reduced trichome branching. Genetic mapping indicated that *ABT3* is a new allele of *AXR1* (Liu *et al.*, 2023). Genetic and biochemical analysis showed that AXR1/ABT3 physically interacts with ROP2, a member of Rho GTPase of plants (ROP) family. Transgenic



**Figure 4. The induction of trichomes by jasmonic acid occurs independently of canonical auxin signaling elements. (a)** Effect of JA on trichome formation in wild-type and auxin related *tir1/afb2/afb3*, *arf7/arf19* and *slr1* mutant seedlings germinated and grown in medium with the solvent (control) or increasing concentrations of JA. **(b)** Representative images of leaves from plants grown under varied jasmonic acid supplementation. Graph bars represent the means ± standard error. The experiment was repeated twice with comparable results. Scale bar= 1 mm.



**Figure 5. Jasmonic acid induces trichome formation and patterning via GL2.** Wild-type (Col-0) *Arabidopsis* seedlings and *gl2* mutants were germinated and grown during 12 days in MS 0.2X medium supplemented with solvent (control) and increasing JA concentrations. (a) Trichome number per mm<sup>2</sup> in leaves was determined. The bars represent standard error. (b) Representative images of leaves of Col-0, *GL2:uidA* expressing line and *gl2* mutant seedlings grown at increasing JA supplementation. The experiment was repeated three times with similar results. Scale bar = 1 mm.



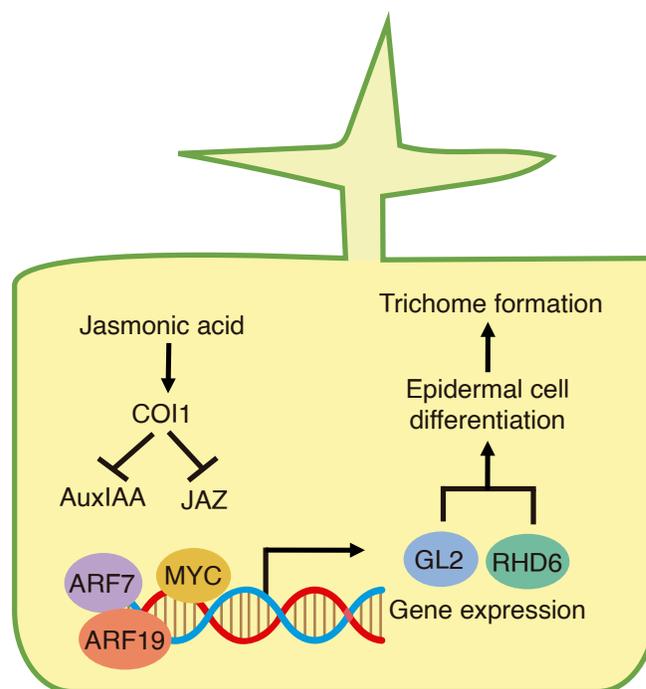
**Figure 6. Roles of root hair patterning genes CPC and RHD6 in jasmonic acid induced trichome formation.** Wild-type (Ws) seedlings, *cpc* and *rhd6* mutants were germinated and grown for 12 days in MS 0.2X medium supplemented with the solvent (control), 1, 2, 4, and 8 μM JA. **(a)** Number of trichomes per mm<sup>2</sup> was determined by microscopical analysis. Bars represent standard error. **(b)** Representative images of leaves of WT (Wassilewskija, Ws ecotype) besides *cpc* and *rhd6* mutant seedlings grown under different JA treatments. Scale bar = 1 mm. The experiment was repeated three times with comparable results.

plants expressing an active form of ROP2 (CA-ROP2) reduced trichome branching, whereas elevated AXR1 expression in CA-ROP2 transgenic plants, repressed ROP2 expression and rescued the defects of trichome branching in CA-ROP2, indicating that AXR1 negatively regulates ROP2 via ubiquitin-proteasome pathway (Liu *et al.*, 2023).

Examples of crosstalk between IAA and JA signaling involve the auxin-related mutant *axr1*, which is resistant to exogenous supplementation of JA in primary root growth inhibition assays (Tiryaki and Staswick, 2002). Moreover, JA promotes auxin biosynthesis by up-regulating YUCCA8 and YUCCA9 (Hentrich *et al.*, 2013) and homeostasis of IAA and JA can simultaneously be regulated by amidohydrolases (Zhang *et al.*, 2016). However, to the best of our knowledge, whether JA affects trichome development via auxin or auxin-related genetic elements remained to be investigated. The receptors from the TIR1/AFB family and the auxin-signaling repressors Aux/IAAs have well defined functions in growth and epidermal cell specification. For instance, the *tir1* mutant, along with its paralogs *afb1*, *afb2*, and *afb3*, had decreased root hair growth (Dharmasiri *et al.*, 2005). We found that the *tir1/afb2/afb3* and *slr1-1* mutants were equally sensitive to the WT seedlings in trichome formation, whereas the *arf7/arf19* was somewhat resistant to this effect. These data suggest that JA epidermal cell response requires specific components of the auxin perception cascade.

In the *Arabidopsis* root epidermis, hair cell types are specified in a distinct position-dependent pattern determined by transcriptional feedback loops in which CAPRICE (CPC), and GLABRA2 (GL2) genes play a critical role. In addition, the ROOT HAIR DEFECTIVE6 (RHD6) is required for root hair initiation acting in an auxin signaling pathway (Masucci *et al.*, 2004). To further understand the roles of these genes in leaf epidermal patterning, we examined the phenotypes of WT, *gl2*, *rhd6* and *cpc* mutants. At low JA concentrations, no formation of trichomes occurred in leaves of *gl2* mutants, however at the highest JA concentration tested, the formation of aberrant trichomes on leaf margins could be observed, suggesting that a GL2 independent mechanism is employed by JA to promote trichome initiation, but it requires GL2 for a normal cell differentiation program underlying trichome morphology.

Transgenic plants carrying the *GL2:uidA* reporter gene show GUS activity at all developmental stages of trichomes, and in epidermal cells that surrounds the site of trichome initiation (Ohashi *et al.*, 2002). Additionally, we found that the induction of trichome formation



**Figure 7. Proposed model for the role of JA in trichome formation.** After activation of defense responses (e.g. herbivory), JA is produced and perceived by its receptor COI1, which regulates the activity of the transcription factors ARF7, ARF19, and MYC to control gene expression and epidermal cell differentiation, which leads to trichome formation.

in response to JA was accompanied by *GL2:uidA* expression in leaves indicating that GL2 plays positive roles in mediating the JA-regulated trichome formation. It was observed that seedlings of *rhd6* mutants develop fewer trichomes on leaves, phenotype that could not be rescued by JA. On the other hand, we observed more trichomes in *cpc* mutants compared with the WT irrespective of JA supplementation, thus indicating that CPC acts as a negative regulator for the JA-induced trichome formation in opposition to the proposed role of GL2. A schematic model that summarizes the role of JA on trichome formation is presented in **Figure 7**, in which JA is recognized by its receptor COI1, which triggers the degradation of the JA-signaling repressors of the JAZ family, and also auxin-signaling repressors Aux/IAA. Then, the transcription factors of JA and auxin-responsive genes, including MYC, ARF7, and ARF17, regulate GL2 and RHD6 gene expression, two essential elements for epidermal cell differentiation and trichome formation.

Taken together, our results indicate that JA alters the leaf epidermal cell differentiation program via COI1, and by crosstalk with specific auxin signaling components and cell patterning genes. The possibility that JA could influence this same group of genes for specification

of other kinds of epidermal cells, such as root hairs or stomata, is an open question.

## Acknowledgments

Drs. Claire Grierson, Luis Herrera-Estrella, and Mark Estelle are thanked for providing us with *Arabidopsis* mutant seedlings. This work was supported by the Consejo de la Investigación Científica (UMSNH, México).

## References

Browse J (2009). The power of mutants for investigating jasmonate biosynthesis and signaling. *Phytochemistry* 70:1539-1546.

Dharmasiri N, Dharmasiri S, Weijers D, Lechner E, Yamada M, Hobbie L, Ehrismann JS, Jurgens G, Estelle M (2005). Plant development is regulated by a family of auxin receptor F box proteins. *Dev. Cell.* 9:109-119.

Di Cristina M, Sessa G, Dolan L, Linstead P, Baima S, Ruberti I, Morelli G (1996). The *Arabidopsis* Athb-10 (GLABRA2) is an HD-Zip protein required for regulation of root hair development. *Plant J* 10:393-402.

Feys B, Benedetti CE, Penfold CN, Turner JG (1994). *Arabidopsis* mutants selected for resistance to the phytotoxin coronatine are male sterile, insensitive to methyl jasmonate, and resistant to a bacterial pathogen. *Plant Cell* 6:751-759.

Fukaki H, Tameda S, Masuda H, Tasaka M (2002). Lateral root formation is blocked by a gain-of-function mutation in the SOLITARY-ROOT/IAA14 gene of *Arabidopsis*. *Plant J* 29:153-168.

Hauser MT (2014). Molecular basis of natural variation and environmental control of trichome patterning. *Front Plant Sci* 5:320.

Hentrich M, Sánchez-Parra B, Pérez Alonso MM, Carrasco Loba V, Carrillo L, Vicente-Carbajosa J, Medina J, Pollmann S (2013). YUCCA8 and YUCCA9 overexpression reveals a link between auxin signaling and lignification through the induction of ethylene biosynthesis. *Plant Signal Behav.* 8(11):e26363.

Hung CY, Lin Y, Zhang M, Pollock S, Marks MD, Schiefelbein J (1998). A common position-dependent mechanism controls cell-type patterning and GLABRA2 regulation in the root and hypocotyl epidermis of *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 117:73-84.

Ishida, T, Kurata, T, Okada K, Wada, T (2008). A genetic regulatory network in the development of trichomes and root hairs. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59:365-386.

Kabir N, Wahid S, Rehman S, Qanmber G (2024). The intricate world of trichome development: From signaling pathways to transcriptional regulation. *Environ. Exper. Bot.* 217,105549.

Katsir L, Schilmiller AL, Staswick PE, He SY, Howe GA (2008). COI1 is a critical component of a receptor for jasmonate and the bacterial virulence factor coronatine. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 105:7100-7105.

Kirik V, Lee MM, Wester K, Herrmann U, Zheng Z, Oppenheimer D, Schiefelbein J, Hulskamp M (2005). Functional diversification of MYB23 and GL1 genes in trichome morphogenesis and initiation. *Development.* 132(7):1477-85.

Kirik V, Schnittger A, Radchuk V, Adler K, Hülkamp M, Bäumlein H (2001). Ectopic expression of the *Arabidopsis* AtMYB23 gene induces differentiation of trichome cells. *Dev Biol.* 235(2):366-77.

Lee MM, Schiefelbein J (1999). WEREWOLF, a MYB-related protein in *Arabidopsis*, is a position-dependent regulator of epidermal cell patterning. *Cell.* 99(5):473-83.

Leyser HM, Lincoln CA, Timpte C, Lammer D, Turner J, Estelle M (1993). *Arabidopsis* auxin-resistance gene AXR1 encodes a protein related to ubiquitin-activating enzyme E1. *Nature* 364:161-164.

Lincoln C, Britton JH, Estelle M (1990). Growth and development of the *axr1* mutants of *Arabidopsis*. *Plant Cell* 2:1071-1080.

Liu L, Niu L, Ji K, Wang Y, Zhang C, Pan M, Wang W, Schiefelbein J, Yu F, An L (2023). AXR1 modulates trichome morphogenesis through mediating ROP2 stability in *Arabidopsis*. *Plant J.* 116(3):756-772.

Masucci JD, Schiefelbein JW (1994). The *rhd6* mutation of *Arabidopsis thaliana* alters root-hair initiation through an auxin- and ethylene-associated process. *Plant Physiol.* 106:1335-1346.

Masucci JD, Rerie WG, Foreman DR, Zhang M, Galway ME, Marks MD, Schiefelbein JW (1996). The homeobox gene GLABRA2 is required for position-dependent cell differentiation in the root epidermis of *Arabidopsis thaliana*. *Development* 122:1253-1260.

Masucci JD, Schiefelbein JW (1994). The *rhd6* mutation of *Arabidopsis thaliana* alters root-hair initiation through an auxin- and ethylene-associated process. *Plant Physiol.* 106(4):1335-1346.

Mathur J, Chua NH (2000). Microtubule stabilization leads to growth reorientation in *Arabidopsis* trichomes. *Plant Cell* 12:465-477.

Menand B, Yi K, Jouannic S, Hoffmann L, Ryan E, Linstead P, Schaefer DG, Dolan L (2007). An ancient mechanism controls the development of cells with a rooting function in land plants. *Science.* 316(5830):1477-80.

Mittal D, Gautam JK, Varma M, Laie A, Mishra S, Behera S, Vadassery J (2024). External jasmonic acid isoleucine mediates amplification of plant elicitor peptide receptor (PEPR) and jasmonate-based immune signalling. *Plant Cell Environ.* 47(4):1397-1415.

Murashige T, Skoog F (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15:473-497.

Ohashi Y, Oka A, Ruberti I, Morelli G, Aoyama T (2002). Ectopically additive expression of GLABRA2 alters the frequency and spacing of trichome initiation. *Plant J.* 29:359-369.

Parry G, Calderon-Villalobos LI, Prigge M, Peret B, Dharmasiri S, Itoh H, Lechner E, Gray WM, Bennett M, Estelle M (2009). Complex regulation of the TIR1/AFB family of auxin receptors. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:22540-22545.

Pérez-Alonso MM, Sánchez-Parra B, Ortiz-García P, Santamaría ME, Díaz I, Pollmann S (2021). Jasmonic acid-dependent MYC

- transcription factors bind to a tandem G-Box motif in the *YUCCA8* and *YUCCA9* promoters to regulate biotic stress responses. *Int. J. Mol. Sci.* 22(18):9768.
- Pesch M, Schultheiss I, Klopffleisch K, Uhrig JF, Koegl M, Clemen CS, Simon R, Weidtkamp-Peters S, Hulskamp M (2015). TRANSPARENT TESTA GLABRA1 and GLABRA1 compete for binding to GLABRA3 in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 168:584-597.
- Raya-González J, Pelagio-Flores R, López-Bucio J (2012). The jasmonate receptor CO11 plays a role in jasmonate-induced lateral root formation and lateral root positioning in *Arabidopsis thaliana*. *J. Plant Physiol.* 169:1348-1358.
- Rerie WG, Feldmann, KA, Marks MD (1994). The GLABRA2 gene encodes a homeo domain protein required for normal trichome development in *Arabidopsis*. *Genes Dev.* 8:1388-1399.
- Runyon JB, Mescher MC, De Moraes CM (2010). Plant defenses against parasitic plants show similarities to those induced by herbivores and pathogens. *Plant Signal. Behav.* 5:929-931.
- Schnittger A, Hülskamp M (2002). Trichome morphogenesis: a cell-cycle perspective. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 357:823-826.
- Shibata M, Sugimoto K (2019). A gene regulatory network for root hair development. *J Plant Res.* 132(3):301-309.
- Staswick PE, Tiryaki I (2004). The oxylipin signal jasmonic acid is activated by an enzyme that conjugates it to isoleucine in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 16:2117-2127.
- Szymanski DB, Jilk RA, Pollock SM, Marks MD (1998). Control of *GL2* expression in *Arabidopsis* leaves and trichomes. *Development* 125:1161-1171.
- Tiryaki I, Staswick PE (2002). An *Arabidopsis* mutant defective in jasmonate response is allelic to the auxin-signaling mutant *axr1*. *Plant Physiol.* 130:887-894.
- Traw MB, Bergelson J (2003). Interactive effects of jasmonic acid, salicylic acid, and gibberellin on induction of trichomes in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 133:1367-1375.
- Wada T, Tachibana T, Shimura Y, Okada K (1997). Epidermal cell differentiation in *Arabidopsis* determined by a Myb homolog, CPC. *Science* 277:1113-1116.
- Wagner GJ, Wang E, Shepherd RW (2004). New approaches for studying and exploiting an old protuberance, the plant trichome. *Ann. Bot.* 93:3-11.
- Wasternack C, Hause B (2013). Jasmonates: biosynthesis, perception, signal transduction and action in plant stress response, growth and development. An update to the 2007 review in *Annals of Botany*. *Ann. Bot.* 111:1021-1058.
- Wilmoth JC, Wang S, Tiwari SB, Joshi AD, Hagen G, Guilfoyle TJ, Alonso JM, Ecker JR, Reed JW (2005). NPH4/ARF7 and ARF19 promote leaf expansion and auxin-induced lateral root formation. *The Plant J.* 43:118-130.
- Xie DX, Feys BF, James S, Nieto-Rostro M, Turner JG (1998). CO11: an *Arabidopsis* gene required for jasmonate-regulated defense and fertility. *Science* 280:1091-1094.
- Yan J, Zhang C, Gu M, Bai Z, Zhang W, Qi T, Cheng Z, Peng W, Luo H, Nan F, Wang Z, Xie D (2009). The *Arabidopsis* CORONATINE INSENSITIVE1 protein is a jasmonate receptor. *Plant Cell* 21:2220-2236.
- Yoshida Y, Sano R, Wada T, Takabayashi J, Okada K (2009). Jasmonic acid control of GLABRA3 links inducible defense and trichome patterning in *Arabidopsis*. *Development.* 136(6):1039-48.
- Zhang T, Poudel AN, Jewell JB, Kitaoka N, Staswick P, Matsuura H, Koo AJ (2016). Hormone crosstalk in wound stress response: wound-inducible amidohydrolases can simultaneously regulate jasmonate and auxin homeostasis in *Arabidopsis thaliana*. *J. Exp. Bot.* 67:2107-2120.



# Adherencia terapéutica en pacientes con diabetes mellitus tipo 2 de la consulta externa de una unidad de medicina familiar en Zacapu, Michoacán

Therapeutic adherence in patients with type 2 diabetes mellitus in an outpatient clinic of a family medicine unit in Zacapu, Michoacán

Jonathan Ramón Carranza Avalos<sup>1</sup>, Juan Martín Morales Bedolla<sup>2</sup>, Carlos Sánchez Anguiano<sup>3</sup>, Brenda Paullette Morales Hernández<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, Coordinación de Educación. Zacapu, Michoacán, México.

<sup>2</sup> Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, Jefatura de Enfermería. Zacapu, Michoacán, México.

<sup>3</sup> Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, Departamento de Enseñanza. Zacapu, Michoacán, México.

## Historial

Manuscrito recibido: 19 de diciembre de 2024

Manuscrito aceptado: 30 de mayo de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Brenda Paullette Morales Hernández

bpmh13@hotmail.com

ORCID: 0000-0002-0632-2815

## Resumen

La diabetes mellitus (DM) es causante de múltiples complicaciones derivado del mal control glucémico que genera una baja adherencia terapéutica. En este trabajo se determinó la adherencia terapéutica en 350 pacientes con diabetes mellitus tipo 2, de ambos sexos, mayores de 18 años de edad. Se aplicó Escala de Adherencia a la Medicación de Morisky 8 ítems y se utilizó estadística descriptiva y prueba  $X^2$  para asociación de variables, con  $p$ Valor  $<0.05$ . Los porcentajes de los pacientes que presentaron adherencia terapéutica fueron: baja 16.9% ( $n=59$ ), media 39.1% ( $n=137$ ) y alta 44.0% ( $n=154$ ). La baja adherencia se asoció al uso de polifarmacia [ $p=0.033$ ] y mal control glucémico [ $p<0.001$ ]. Se concluye que una tercera parte de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2, adscritos al Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, presentaron una alta adherencia terapéutica, encontrando asociación entre la escolaridad, el grado de control glucémico y la polifarmacia.

**Palabras clave:** Diabetes Mellitus tipo 2; Cumplimiento y adherencia al tratamiento; Control glucémico; Atención primaria.

## Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se define como diabetes mellitus (DM) al desorden metabólico de múltiples etiologías, caracterizado por hiperglucemia crónica con disturbios en el metabolismo de los carbohidratos, grasas y proteínas y que es el

## Abstract

Diabetes mellitus (DM) is the cause of multiple complications resulting from poor glycemic control that leads to low therapeutic adherence. In this study, therapeutic adherence was determined in 350 patients with type 2 diabetes mellitus, of both sexes, over 18 years of age. The Morisky 8-item Medication Adherence Scale was applied, and descriptive statistics and the  $X^2$  test were used for variable association, with  $p$ Value  $<0.05$ . The percentages of patients who showed therapeutic adherence were: low 16.9% ( $n=59$ ), medium 39.1% ( $n=137$ ), and high 44.0% ( $n=154$ ). Low adherence was associated with the use of polypharmacy [ $p=0.033$ ] and poor glycemic control [ $p<0.001$ ]. It is concluded that one third of patients with type 2 diabetes mellitus, registered at the General Hospital of Zone with Family Medicine No. 2, exhibited high therapeutic adherence, finding an association between education level, the degree of glycemic control, and polypharmacy.

**Keywords:** Diabetes Mellitus type 2; Compliance and adherence to treatment; Glycemic control; Primary care.

resultado de defectos en la secreción y/o en la acción de la insulina (OMS, 2025).

A nivel mundial existen 463 millones de adultos de entre 20 y 79 años con diabetes, cifras que se estima aumenten a 700 millones en 2045 (Russo *et al.*, 2023). En la actualidad, según la International Diabetes Federation

(IDF) México ocupa a nivel mundial el octavo lugar al contar con 13.6 millones de personas con diabetes. En lo que respecta a América del Norte, México se encuentra entre los cinco países con mayor número de personas con diabetes, estimando que uno de cada siete adultos presenta dicha comorbilidad y uno de cada tres adultos desconoce padecer diabetes mellitus (International Diabetes Federation, 2025).

Los estados como Tabasco, Jalisco y Puebla, en el informe trimestral del Sistema de Vigilancia Epidemiológica Hospitalaria de Diabetes Mellitus Tipo 2, reportaron el mayor número de ingresos de pacientes con dicho diagnóstico (Secretaría de Salud, 2025). Las múltiples complicaciones microvasculares y macrovasculares como la nefropatía, el pie diabético, la retinopatía, las enfermedades isquémicas cardíacas y las neuropatías que ocasionan daño progresivo y disfunción endotelial, son las principales responsables de la morbilidad y mortalidad de este padecimiento y ocasionadas frecuentemente por el descontrol glucémico persistente y crónico (Medina-Chávez *et al.*, 2025).

En el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), las enfermedades cardiovasculares (falla cardíaca, infarto al miocardio, accidente cerebrovascular y enfermedad coronaria del corazón, entre otros), han sido las principales causantes de muerte en dicha población, seguido de la retinopatía como complicación de la diabetes mellitus (Picó-Guzmán *et al.*, 2022). Para considerar un buen control glucémico, se toma en consideración la cifra de glucosa sérica en ayuno, así como hemoglobina glicosilada (HbA1c), debiendo ser esta última menor a 7%, según Guía NICE 2022 (Kojdamanian, 2022).

El cambio en el estilo de vida, es fundamental en el tratamiento no farmacológico, aunado a la pérdida de peso y dieta baja en azúcares y carbohidratos (Ruano *et al.*, 2023; Quesada *et al.*, 2022). Sin embargo, debe ir en estrecha relación con el tratamiento farmacológico para el control de la diabetes, el cual está encaminado a prevenir las complicaciones agudas y crónicas de la enfermedad, mejorar la calidad de vida y reducir la mortalidad, siendo importante para ello una adecuada adherencia terapéutica.

La adherencia terapéutica según la OMS se define como “la toma de medicación de acuerdo con la dosis, el programa prescrito y la persistencia de tomar la medicación a lo largo del tiempo” (García, 2020). Existen tres factores que recomienda la OMS para mejorar la adherencia al tratamiento, los cuales son la actividad física, las intervenciones como el seguimiento dietético y aquellas que ayudan al reforzamiento a las asistencias

de las citas médicas (Mora-Romo, 2022). Un adecuado apego al tratamiento tanto farmacológico, como no farmacológico, es por lo tanto fundamental, para poder lograr todos los beneficios que los medicamentos pueden proporcionar al ser ingeridos y poder ayudar a un mejor control metabólico y con ello evitar la presencia de complicaciones a futuro como las macro y microvasculares, las cuales se consideran hoy en día las principales causas de mortalidad por este padecimiento (Martín, 2026).

La baja adherencia al tratamiento en adultos mayores con polifarmacia, es un problema de salud pública multifactorial, debido a la gran variedad de factores que se han encontrado asociados dentro de la literatura (Liquori *et al.*, 2023). Entre ellos se encuentran los factores relacionados con el paciente como el género, la vida en pareja, la ocupación y la edad, aquellos relacionados con la enfermedad como el tiempo de evolución de la diabetes mellitus, el sistema sanitario y factores socioeconómicos (Díaz *et al.*, 2023).

En la actualidad se estima que el 52.21% de los adultos mayores en México no siguen los esquemas de tratamiento prescritos por el médico tratante (Loera *et al.*, 2023). Así mismo, se ha encontrado una estrecha relación entre pacientes con pobre control glucémico y una baja adherencia terapéutica (Kibret *et al.*, 2022).

Una herramienta para evaluar la adherencia farmacológica, es la Escala de Adherencia a la Medicación de Morisky 8 ítems (Morisky Medication Adherence Scale - MMAS-8), validada en diferentes versiones tanto en inglés como en español; en España se realizó dicha validación en pacientes con DM2 en el año 2021 (Martínez-Pérez *et al.*, 2021).

La baja adherencia terapéutica priva al paciente de obtener los beneficios que proporcionan los tratamientos médicos, ocasionando comorbilidades a futuro. Es por ello que el objetivo del presente estudio es determinar la adherencia terapéutica que tienen los pacientes con diagnóstico de diabetes mellitus tipo 2 de la consulta externa de medicina familiar.

## Materiales y métodos

### Selección de pacientes

Se implementó un estudio observacional, transversal descriptivo y prospectivo, de mayo a julio del 2023, a 350 pacientes en la sala de espera de la consulta externa de medicina familiar en el Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2 (HGZ/MF NO.2), del Instituto Mexicano del Seguro Social en Zacapu, Michoacán. Este proyecto fue autorizado por los Comités de Ética en Investigación y de Investigación en Salud con el número

de registro R-2023-1603-011.

El cálculo del tamaño de muestra se llevó a cabo aplicando la fórmula para población finita, utilizada cuando se conoce el total de unidades de observación que la integran, en estudios tipo cualitativos (Aguilar-Barojas, 2005) Se incluyeron pacientes de ambos sexos, mayores de 18 años, con diagnóstico de DM2, adscritos al Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2 del Instituto Mexicano del Seguro Social y que hubieran firmado el consentimiento informado. Se excluyeron aquellos sin estudios de laboratorio recientes (glucosa sérica y hemoglobina glicosilada) o con deterioro cognitivo que limitara contestar el cuestionario. Se eliminaron aquellos pacientes con cuestionarios incompletos o que no desearan continuar con el estudio.

A cada paciente que reunió los criterios de selección, se le colectaron variables sociodemográficas: edad, sexo y escolaridad; así como variables clínicas: fármacos hipoglucemiantes, comorbilidades, polifarmacia determinada por el consumo de más de cinco medicamentos de forma simultánea por el mismo período de tiempo (Poblano-Verástegui *et al.*, 2020) y resultados de glucosa sérica o hemoglobina glicosilada de menos de tres meses de antigüedad para determinar el control glucémico.

Se aplicó la escala de Adherencia a la Medicación de Morisky 8 ítems (MMAS-8; Martínez-Pérez *et al.*, 2020; Aguilar-Barojas, 2005; Poblano-Verástegui *et al.*, 2020; Valencia-Monsalvez *et al.*, 2017), con alfa de Cronbach de 0.646, lo que significa adecuada fiabilidad de los resultados. Consta de 7 reactivos con respuestas dicotómicas (Si/No) y un reactivo con respuesta de opción múltiple en escala tipo Likert, categorizando el nivel de adherencia en: alta (8 puntos), media (6-7 puntos) y baja ( $\leq 5$  puntos).

### Análisis estadístico

Los datos se presentan en frecuencias y porcentajes (variables cualitativas) y los datos cuantitativos se presentan en media  $\pm$  DE;  $\chi^2$  para la asociación entre variables categóricas (diferencia estadísticamente significativa,  $p < 0.05$ ). Los datos se analizaron con el paquete estadístico SPSS, versión 23 para Windows.

## Resultados

En la **Tabla 1** se muestran las características sociodemográficas y clínicas de los 350 pacientes con diabetes mellitus que cumplieron con los criterios de selección, predominando el sexo femenino, con escolaridad media completa y como principal comorbilidad la hipertensión arterial sistémica, con una media de edad de 64.65  $\pm$

**Tabla 1.** Variables sociodemográficas y clínicas de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2 adscritos al HGZ/MF No.2 (n=350)

| Variables sociodemográficas     | FR         | (%)        |
|---------------------------------|------------|------------|
| Sexo                            |            |            |
| Masculino                       | 146        | (41.7)     |
| Femenino                        | 204        | (58.3)     |
| Edad (años)                     |            |            |
| 18-40                           | 13         | (3.7)      |
| 41-60                           | 107        | (30.6)     |
| 61-80                           | 197        | (56.3)     |
| Más de 80                       | 33         | (9.4)      |
| Escolaridad                     |            |            |
| Sin escolaridad                 | 6          | (1.7)      |
| Básica incompleta               | 19         | (5.4)      |
| Básica completa                 | 94         | (26.9)     |
| Media incompleta                | 11         | (3.1)      |
| Media completa                  | 183        | (52.3)     |
| Superior                        | 37         | (10.6)     |
| Comorbilidades                  |            |            |
| Hipertensión arterial sistémica | 154 (44.0) | 196 (56.0) |
| Enfermedad renal crónica        | 14 (4.0)   | 336 (96.0) |
| Otros trastornos cardíacos*     | 17 (4.9)   | 333 (95.1) |
| Enfermedades neurológicas       | 2 (0.6)    | 348 (99.4) |

FR (%) = Frecuencia relativa (Porcentaje); \* = Otros trastornos cardíacos como insuficiencia cardíaca, trastornos del ritmo, isquemia cardíaca.

12.74; IC 95%: 19-103 años.

La adherencia terapéutica se determinó con la aplicación de la Escala de Adherencia a la Medicación de Morisky 8 ítems (MMAS-8), siendo baja en 16.9% (n=59), media 39.1% (n=137) y alta 44.0% (n=154). La baja adherencia terapéutica se presentó con mayor frecuencia en aquellos del sexo femenino, en grupo de edad de 61 a 80 años, mientras que se encontró asociación estadísticamente significativa [ $p=0.017$ ] entre adherencia terapéutica y escolaridad, siendo más frecuente la alta adherencia en aquellos pacientes con escolaridad media completa. Así mismo, se encontró asociación entre la adherencia terapéutica con la ingesta de metformina [ $p<0.001$ ], glibenclamida [ $p=0.009$ ] y linagliptina/metformina [ $p=0.045$ ] (**Tabla 2**).

En la **Figura 1**, se observa el grado de control glucémico de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2, determinando que un 31.40% (n=110) no presentaron un adecuado control.

Se encontró que los pacientes del sexo femenino, de

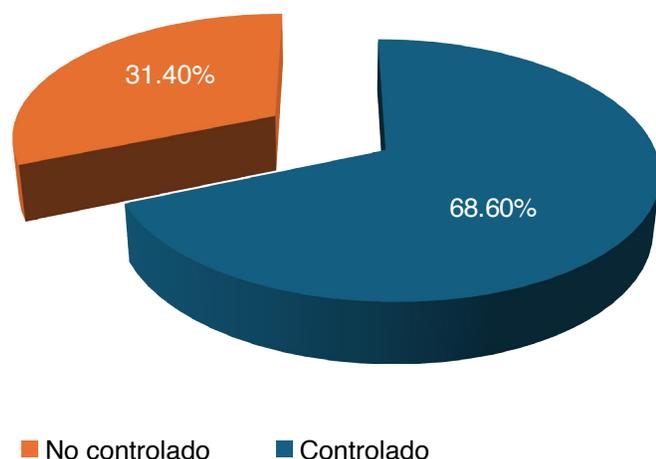
**Tabla 2.** Variables sociodemográficas y fármacos ingeridos por los pacientes con diabetes mellitus tipo 2 adscritos al HGZ/MF No.2 por grado de adherencia terapéutica (n=350)

| Variables               | Baja FR (%) | Media FR (%) | Alta FR (%) | Chi2   | Sig     |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|--------|---------|
| Sexo                    |             |              |             |        |         |
| Masculino               | 24(6.9)     | 54 (15.4)    | 68 (19.4)   | 0.701  | 0.704   |
| Femenino                | 35 (10.0)   | 83 (23.7)    | 86 (24.6)   |        |         |
| Edad (años)             |             |              |             |        |         |
| 18-40                   | 5(1.4)      | 3(0.9)       | 5(1.4)      | 6.627  | 0.357   |
| 41-60                   | 16(4.6)     | 44(12.6)     | 47(13.4)    |        |         |
| 61-80                   | 33(9.5)     | 80(22.9)     | 84(24.0)    |        |         |
| Más de 80               | 5(1.4)      | 10(2.8)      | 18(5.2)     |        |         |
| Escolaridad             |             |              |             |        |         |
| Sin escolaridad         | -           | 1 (0.3)      | 5 (1.4)     | 21.635 | 0.017*  |
| Básica incompleta       | 4 (1.1)     | 6 (1.7)      | 9 (2.6)     |        |         |
| Básica completa         | 21 (6.0)    | 37 (10.6)    | 36 (10.3)   |        |         |
| Media incompleta        | 4 (1.1)     | 2 (0.6)      | 5 (1.4)     |        |         |
| Media completa          | 23 (6.6)    | 84 (24.0)    | 76 (21.7)   |        |         |
| Superior                | 7 (2.0)     | 7 (2.0)      | 23 (6.6)    |        |         |
| Medicamentos            |             |              |             |        |         |
| Metformina              | 53 (15.1)   | 124 (35.4)   | 112 (32.0)  | 18.531 | <0.001* |
| Glibenclamida           | 15 (4.3)    | 38 (10.9)    | 21 (6.0)    | 9.426  | 0.009*  |
| Pioglitazona            | 1 (0.3)     | 2 (0.6)      | 1 (0.3)     | 0.613  | 0.736   |
| Linagliptina/Metformina | 5 (1.4)     | 11 (3.1)     | 26 (7.4)    | 6.217  | 0.045*  |
| Dapaglifozina           | -           | -            | 1 (0.3)     | 1.276  | 0.528   |

Chi2; \*Cifra estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ); FR (%) = Frecuencia Relativa (Porcentaje); Sig = Significancia

61 a 80 años de edad y con baja adherencia terapéutica, fueron quienes presentaron mayor frecuencia de no control glucémico. Se encontró relación estadísticamente significativa entre el grado de control glucémico con la adherencia terapéutica [ $p = <0.001$ ] (**Tabla 3**).

La polifarmacia se presentó en 133(38%) de la población estudiada, obteniendo que existe un mayor grado de adherencia terapéutica en pacientes sin polifarmacia, siendo la adherencia alta la de mayor frecuencia (**Figura 2**).



**Figura 1.** Grado de control glucémico de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2 adscritos al HGZ/MF No.2 (n=350).

## Discusión

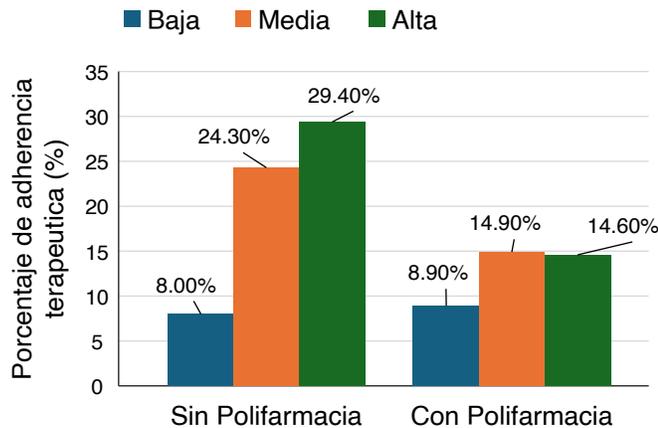
Una adecuada adherencia terapéutica es fundamental para lograr un óptimo control glucémico y por ende mejorar el control metabólico del paciente, logrando a futuro disminuir las complicaciones derivadas del descontrol permanente. En el presente estudio se reportó que el 16.9% presentó una adherencia terapéutica baja, 39.1% media y 44.0% alta, siendo más frecuente la baja adherencia en pacientes del sexo femenino, en grupo de edad de 61-80 años, mientras que la alta adherencia terapéutica se relacionó con la escolaridad, siendo más frecuente en aquellos con escolaridad media completa.

En un estudio realizado en Perú a pacientes con diabetes mellitus tipo 2 de la consulta externa de endocrinología, se encontró una adherencia terapéutica baja en el 38.6%, seguida de la media en 31.4% y por último alta en el

**Tabla 3.** Variables sociodemográficas y adherencia terapéutica de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2 adscritos al HGZ/MF No.2 por grado de control glucémico (n=350)

| Variables              | Controlado FR (%) | No controlado FR (%) | gl | Sig     |
|------------------------|-------------------|----------------------|----|---------|
| Sexo                   |                   |                      |    |         |
| Masculino              | 101(28.9)         | 45 (12.8)            | 1  | 0.836   |
| Femenino               | 139 (39.7)        | 65 (18.6)            |    |         |
| Edad (años)            |                   |                      |    |         |
| 18-40                  | 7(2.0)            | 6(1.7)               | 3  | 0.488   |
| 41-60                  | 71(20.3)          | 36(10.3)             |    |         |
| 61-80                  | 137(39.2)         | 60(17.1)             |    |         |
| Más de 80              | 25(7.1)           | 8(2.3)               |    |         |
| Adherencia terapéutica |                   |                      |    |         |
| Baja                   | 13 (3.8)          | 46 (13.1)            | 2  | <0.001* |
| Media                  | 83 (23.7)         | 54 (15.4)            |    |         |
| Alta                   | 144 (41.1)        | 10 (2.9)             |    |         |

Chi2; \*Cifra estadísticamente significativa (p < 0.05); FR (%) = Frecuencia Relativa (Porcentaje); gl = grados de libertad; Sig = Significancia



**Figura 2.** Polifarmacia en base al grado de adherencia terapéutica de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2 del HGZ/MF No.2 (n=350). Nota: Chi2 6.823, gl 2, p =0.033\*; \*Cifra estadísticamente significativa (p <0.05); % = Porcentaje.

30.0% de los pacientes (Fariás-Vílchez *et al.* (2021), aquí, no se encontró asociación con el sexo ni con la edad, mientras que si se obtuvieron valores estadísticamente significativos con la escolaridad, determinando que aquellos pacientes con bajo nivel escolar tienen un mayor riesgo de presentar baja adherencia terapéutica a diferencia de los que presentan un mayor grado escolar. Esto se puede justificar debido al hecho de ser pacientes con diabetes mellitus tipo 2 de difícil control glucémico, que suelen ser referidos al servicio de endocrinología

por parte del médico de primer nivel de atención y el uso frecuente de polifarmacia en ellos para su adecuado control metabólico.

Krzemińska *et al.* (2021) determinaron que los encuestados puntuaron más alto en la adherencia a las recomendaciones relativas al mantenimiento del autocuidado y los más bajos en la subescala de autocontrol de la glucemia. De igual forma, encontraron que el 52.4% de los encuestados mostraron un bajo nivel de adherencia, el 39.2% un nivel moderado y solo el 8.3% de los pacientes presentaron alta adherencia al tratamiento; sin embargo, en su estudio aplicaron el cuestionario SCODI como instrumento de evaluación. No obstante, refirieron relación entre el sexo femenino, la educación y la situación laboral con el autocuidado.

Pérez *et al.* (2019) realizaron un estudio en Tabasco, México, a pacientes con edad promedio de 57.76 años, reportando una adherencia alta en el 96.9%, una adherencia media en 2.3% y baja en el 0.8% de la población encuestada, prevaleciendo la baja adherencia en aquellos del sexo femenino, casados y con escolaridad primaria. Sin embargo, el instrumento de evaluación que ellos utilizaron fue diferente, lo que puede sugerir la razón del por qué presentaron índices más altos de adherencia terapéutica en su población.

En cuanto al control glucémico en este estudio de investigación, identificamos que el 68.6% de los participantes tenían un adecuado control, presentando fuerte asociación con el grado de adherencia terapéutica, siendo alta en aquellos pacientes controlados en un 41.1%, en contraste con los pacientes no controlados quienes tenían una adherencia baja en el 13.1%. Esto podría ser consecuencia del efecto positivo que ejercen los fármacos en el organismo al presentar un correcto apego a la posología e indicaciones farmacológicas, así como de los beneficios del tratamiento no farmacológico. Al respecto Toledo *et al.* (2021) estudiaron la relación entre la satisfacción con el tratamiento para diabetes y control glucémico en pacientes mayores de edad, predominando aquellos del sexo femenino 64.0%, entre los 18 a 64 años de edad y escolaridad básica. Encontraron que el 44.7% de la población estaba controlada y 95.8% referían sentirse muy satisfechos con su tratamiento. Sin embargo, no encontraron relación significativa entre el grado de control glucémico con la satisfacción del paciente, ni tampoco analizaron la relación entre el grado de adherencia terapéutica con el grado de control glucémico a diferencia del presente estudio.

Un estudio realizado en Cuba por Díaz *et al.* (2024) estableció una relación entre el grado de control glucémico con la adherencia terapéutica, siendo más frecuen-

te la alta adherencia en aquellos pacientes controlados, así como en mayores de 65 años de edad, del sexo masculino, con nivel educacional medio alto y que viven acompañados, lo que sugiere que a mayor grado escolar en los pacientes y mayor apego al tratamiento tanto farmacológico como no farmacológico, se logra un mejor control metabólico.

Respecto a la relación entre la polifarmacia y la adherencia al tratamiento, se determinó que presentan una mejor adherencia terapéutica aquellos pacientes sin polifarmacia, lo cual difiere de lo reportado por Lorido *et al.* (2019), quienes encontraron que el 77.8% de sus participantes presentaron una buena adherencia terapéutica, de los cuales 79.4% de los individuos tomaban entre 5 y 10 fármacos recetados, mientras que el 20.6% tomaba más de 10 medicamentos. Sin embargo, únicamente encontraron relación estadísticamente significativa con la situación sociofamiliar, aunado a que toda su población de estudio presentaba polifarmacia a diferencia del nuestro, en el que se ha encontrado que existe una fuerte asociación entre la adherencia terapéutica con la escolaridad, el grado de control glucémico y la polifarmacia. De ahí la importancia, que el médico tratante supervise el adecuado apego al tratamiento en todo aquel paciente con persistente mal control glucémico pese a los múltiples ajustes terapéuticos ofertados para evitar con ello la polifarmacia, ya que solo potenciará la baja adherencia terapéutica.

Como limitantes se obtuvo la falta de inclusión de algunas otras variables como red de apoyo social, tipología familiar, años de evolución de la diabetes mellitus tipo 2, incluso de ansiedad y depresión para poderlos considerar como posibles factores asociados a la baja adherencia terapéutica, por lo que sugerimos que en futuras investigaciones se tenga en consideración para ampliar la información al momento de realizar el análisis de los datos.

## Conclusiones

Únicamente una tercera parte de los pacientes con diabetes mellitus tipo 2, adscritos al Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, presentan una alta adherencia terapéutica, encontrando asociación entre la escolaridad, el grado de control glucémico y la polifarmacia.

## Agradecimientos

Al personal de Salud del Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2 de Zacapu, Michoacán, así como los participantes de dicho estudio.

## Referencias

Organización Mundial de la Salud (2025). “Guía de Bolsillo de Atención Integral de la Diabetes para el 1ro y 2do nivel de atención”, [https://extranet.who.int/ncdecs/Data/GTM\\_D1\\_Guia%20Bolsillo%20Diabetes%20Mellitus.pdf](https://extranet.who.int/ncdecs/Data/GTM_D1_Guia%20Bolsillo%20Diabetes%20Mellitus.pdf), [consultado el 22 de mayo 2025].

Russo M, Grande-Ratti M, Burgos M, Molaro A, Bonella M (2023). Prevalencia de diabetes, características epidemiológicas y complicaciones vasculares. *Archivos de Cardiología de México* 93(1):30-36. doi:10.24875/acm.21000410

International Diabetes Federation (2025). “Diabetes Atlas 11th Edition 2025”, <https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025/>, [consultado el 22 de mayo de 2025].

Secretaría de Salud (2025). “Informe Trimestral Sistema de Vigilancia Epidemiológica Hospitalaria de Diabetes Mellitus Tipo 2”, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/995714/InformeTrimestralSVEDMT2-1Trim-2025.pdf>, [consultado el 22 de mayo 2025].

Medina-Chávez JH, Vázquez-Parrodi M, Santoyo-Gómez DL, Azuela-Antuna J, Carnica-Cuellar JC, Herrera-Landero A, *et al.* (2025). Protocolo de Atención Integral: complicaciones crónicas de diabetes mellitus 2. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social* 60(1):S19-S33.

Picó-Guzmán FJ, Martínez-Montañez OG, Ruelas-Barajas E, Hernández-Ávila M (2022). Estimación del impacto económico por complicaciones cardiovasculares y de diabetes mellitus 2019-2028. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social* 60(2):S86-S95.

Kojdamanian V (2022). Guía NICE 2022: actualización en el manejo de la diabetes mellitus tipo 2 en personas adultas. *Evidencia, actualización en la práctica ambulatoria* 25(2):e007015. doi:10.51987/evidencia.v25i3.7015

Ruano DE, Ruano HJ, Yépez DA, Herrería MA, Falcón KD, López EJ (2023). Tratamiento actual de la diabetes mellitus tipo 2. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 7(2):379-95. doi:10.37811/cl\_rcm.v7i2.5300

Quesada D, Coto F, González M, Herrera D, Herrera JG, Jiménez JG, *et al.* (2022). Primer Consenso Costarricense para el manejo integral de la Diabetes Mellitus – Junio, 2022 *Revista Costarricense de Cardiología* 24(1):106-114.

García S (2020). Factores de riesgo de no adherencia al tratamiento en pacientes mayores de un núcleo rural. *Revista de la OFIL* 30(2):115-120. doi:s1131-94292020000200010.

Mora-Romo JF (2022). Adherencia al tratamiento en personas con diabetes mellitus tipo 2 en México: Estudio de meta-análisis. *Psicumex* 12(1):1-20. doi:10.36793/psicumex.v12i1.493

Martín AL (2026). Repercusiones para la salud pública de la adherencia terapéutica deficiente. *Revista Cubana de Salud Pública* 3(12):1-10.

Liquori G, Dionisi S, Giannetta N, Di Simone E, De Leo A, Panattoni N, *et al.* (2023). Elderly patients with multimorbidity in the home sitting: umbrella review on therapeutic non-adherence causes.

*European Review for Medical and Pharmacological Sciences* 27(19):9234-9247. doi:10.26355/eurrev\_202310\_33951.

Díaz H, Marcial D, Galicia-Rodríguez L, Villarreal-Ríos E, Julián C, Elizarrarás-Rivas J (2023). Factores asociados a la adherencia al tratamiento farmacológico en pacientes con diabetes e hipertensión arterial. *Horizonte Médico (Lima)* 23(4):e2383. doi:10.24265/horizmed.2023.v23n4.01.

Loera J, Martínez H, Torres EE, Almazán L, Vázquez VH (2023). Prevalencia y factores asociados a adherencia terapéutica de pacientes con diabetes mellitus 2: post pandemia por COVID 19. *Archivos en Medicina Familiar* 25(5):235-245.

Kibret A, Kassie A, Emagn A, Ashete E (2022). Medication adherence and its impact on glycemic control in type 2 diabetes mellitus patients with comorbidity: A multicenter cross-sectional study in Northwest Ethiopia. *PLoS One* 17(9):e0274971. doi:10.1371/journal.pone.0274971.

Martínez-Pérez P, Orozco-Beltrán D, Pomares-Gómez F, Hernández-Rizo JL, Borrás-Gallen A, Gil-Guillen VF, et al. (2021). Validation and psychometric properties of the 8-item Morisky Medication Adherence Scale (MMAS-8) in type 2 diabetes patients in Spain. *Atención Primaria* 53(2):101942. doi:10.1016/j.aprim.2020.09.007.

Aguilar-Barojas S (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco* 11(1-2): 333-338.

Poblano-Verástegui O, Bautista-Morales AC, Acosta-Ruiz O, Gómez-Cortez PM, Saturno-Hernández PJ (2020). Polifarmacia en México: un reto para la calidad en la prescripción. *Salud Pública de México* 62(6):859-867.

Valencia-Monsalvez F, Mendoza-Parra S, Luengo-Machuca L (2017). Evaluación de la Escala Morisky de adherencia a la medicación (MMAS-8) en adultos mayores de un centro de atención primaria en Chile. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 34(2):245-249. doi:10.17843/rpmesp.2017.342.2206

Fariás-Vílchez BA, Bardales D (2021). Conocimientos sobre diabetes mellitus tipo 2 y adherencia al tratamiento en pacientes del hospital Reátegui de Piura, Perú. *Acta Médica Peruana* 38(1):34-41. doi:10.35663/amp.2021.381.1119

Krzemińska S, Lomper K, Chudiak A, Ausili D, Uchmanowicz I (2021). The association of the level of self-care on adherence to treatment in patients diagnosed with type 2 diabetes. *Acta Diabetologica* 58 (4):437-45. doi:10.1007/s00592-020-01628-z

Pérez A, López RA, Garrindo SMG, Casas D, Rodríguez A (2019). Factores condicionantes de la falta de adherencia terapéutica en pacientes con diabetes mellitus tipo 2: caso Unidad de Medicina Familiar 33, Tabasco México. *WAXAPA* 10(18):20-5.

Toledo A, Liévanos MA, Santillán A (2021). Relación entre satisfacción con el tratamiento para diabetes y control glucémico en pacientes mayores de edad. *Atención Familiar* 28(2):95-102.

Díaz AM, Rodríguez A, Achiong FJ, Cardona DL, Maldonado G, Londoño EA, et al. (2024). Adherencia terapéutica de pacientes con diabetes mellitus tipo 2 en cuatro áreas de salud del país. *Revista Finlay* 14(1):78-90.

Lorido I, Hernanz B, Cordero E, González A, Menaya RG, Gómez J (2019). Adherencia terapéutica en pacientes polimedicados y factores condicionantes en un grupo de pacientes. *Archivos en Medicina Familiar* 21(2):51-59.



# Evaluación del burnout desde una perspectiva de género: desarrollo de una plataforma digital con análisis estadístico e inteligencia artificial

Burnout assessment from a gender perspective: development of a digital platform with statistical analysis and artificial intelligence

Aldo Carlos Ruiz Jurado, Edna Araceli Romero Flores\* , Elizabeth Eugenia Díaz Castellanos, Alma Gabriela Alcalde Pérez, Maricela Gallardo Córdova

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

## Historial

Manuscrito recibido: 22 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 10 de junio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Edna Araceli Romero Flores

[edna.rf@orizaba.tecnm.mx](mailto:edna.rf@orizaba.tecnm.mx)

ORCID: 0000-0001-9058-9346

## Resumen

El burnout, reconocido por la Organización Mundial de la Salud como un síndrome asociado al estrés laboral crónico, presenta diferencias según el género. Este estudio analizó 86 trabajadores de un centro de rehabilitación en Veracruz, México, utilizando el Maslach Burnout Inventory (MBI-HSS) y la plataforma digital AnalytIQ Surveys, diseñada específicamente para esta investigación. Los resultados muestran que las mujeres presentan mayor agotamiento emocional, mientras que los hombres reportan mayor despersonalización y percepción de realización personal. Además, se identificó una correlación negativa entre género y percepción de energía laboral, indicando que las mujeres experimentan mayor fatiga. Estos hallazgos resaltan la necesidad de estrategias organizacionales con perspectiva de género, enfocadas en equilibrar la carga laboral y fortalecer el apoyo psicológico.

**Palabras clave:** Burnout, inteligencia artificial, análisis de género, análisis estadístico, herramienta digital.

## Introducción

La salud mental en el ámbito laboral ha cobrado una importancia creciente en los últimos años, al ser un factor determinante en el desempeño profesional y la sostenibilidad organizacional. Las condiciones de trabajo pueden afectar significativamente el bienestar psicológico de los empleados, influyendo en su productividad, compromiso y estabilidad emocional (Aguilar Hernández *et al.*, 2023). Debido a esto, diversas reformas y normativas laborales han comenzado a priorizar la identificación y mitigación de factores de riesgo psicosocial, considerando que el agotamiento y el estrés crónico no solo impactan a los trabajadores, sino también la eficiencia y

## Abstract

Burnout, recognized by the World Health Organization as a syndrome associated with chronic occupational stress, varies by gender. This study analyzed 86 workers from a rehabilitation center in Veracruz, Mexico, using the Maslach Burnout Inventory (MBI-HSS) and the AnalytIQ Surveys platform, specifically designed for this research. The results show that women experience higher emotional exhaustion, while men report greater depersonalization and a higher sense of personal accomplishment. Additionally, a negative correlation was found between gender and perceived work energy, indicating that women experience greater fatigue. These findings highlight the need for gender-focused organizational strategies aimed at balancing workload distribution and strengthening psychological support.

**Keywords:** Burnout, artificial intelligence, gender analysis, statistical analysis, digital tool.

reputación de las organizaciones.

Uno de los síndromes más estudiados en este contexto es el burnout, un estado de desgaste emocional, despersonalización y reducción de la realización personal derivado de la exposición prolongada a condiciones laborales demandantes (Molero *et al.*, 2018). Este fenómeno es particularmente preocupante en el sector salud, donde el trabajo implica un alto nivel de involucramiento emocional y empatía en la atención a los pacientes. Investigaciones recientes han demostrado que los empleados en entornos de rehabilitación y atención psicológica tienen mayor riesgo de agotamiento debido a la constante interacción con personas que requieren apoyo físico y

emocional (Santamaría *et al.*, 2021).

Estudios previos han identificado diferencias significativas en la manifestación del burnout entre hombres y mujeres; mientras que las mujeres tienden a presentar mayores niveles de agotamiento emocional, los hombres muestran una mayor predisposición a la despersonalización, lo que podría comprometer la calidad de la atención que brindan (Rudman *et al.*, 2020). Además de la carga emocional inherente a este tipo de trabajo, un obstáculo importante en la detección y análisis del burnout es la accesibilidad a herramientas estadísticas especializadas. Software como SPSS y Minitab, ampliamente utilizados para el análisis de datos en salud ocupacional y psicología, presentan altos costos y requerimientos de hardware, lo que limita su uso en diversas instituciones (Ozgun *et al.*, 2017). Esto dificulta la toma de decisiones basada en evidencia y retrasa la implementación de estrategias efectivas de intervención.

Este estudio se centra en la evaluación del burnout desde una perspectiva de género dentro de un centro de rehabilitación integral y psicológica en Veracruz, México. Esta institución atiende a personas con discapacidad neuromusculo-esquelética, brindando terapias y tratamientos especializados. Dado el tipo de atención que se ofrece, el personal enfrenta una carga emocional considerable, lo que podría traducirse en altos niveles de desgaste laboral (Oprinca-Muja *et al.*, 2025). Se busca evidenciar la prevalencia del burnout en este centro y proponer soluciones innovadoras que contribuyan a la salud mental de los empleados y a la sostenibilidad organizacional. La implementación de una plataforma accesible y automatizada podría servir como modelo para otras instituciones de salud, facilitando la detección temprana del burnout y promoviendo estrategias organizacionales para mejorar el bienestar laboral y la calidad del servicio.

## Metodología

### Valoración de los niveles de burnout

Para evaluar el nivel de burnout en los trabajadores, en este estudio se utilizó el Maslach Burnout Inventory-

Human Services Survey (MBI-HSS), un instrumento validado internacionalmente que mide tres dimensiones clave: agotamiento emocional (EE, por sus siglas en inglés *Emotional Exhaustion*), despersonalización (DP, por *Depersonalization*) y realización personal (PA, por *Personal Accomplishment*) (Maslach y Leiter, 1999). El MBI-HSS consta de 22 ítems, cada uno con una escala de respuesta de 0 a 6 puntos, y se estructura en la **Tabla 1**.

Los resultados del **MBI-HSS** se interpretan en función de los puntajes obtenidos en cada subescala, categorizando los niveles de **burnout** en **bajo**, **medio** o **alto** según los valores de referencia indicados en la **Tabla 2**.

Para este estudio se desarrolló AnalytIQ Surveys, una herramienta digital programada específicamente para la evaluación del burnout en entornos laborales (**Figura 1**).

La plataforma fue desarrollada utilizando **PHP para la gestión del backend y la base de datos en MySQL**, mientras que **Python** se empleó para la ejecución de análisis estadísticos avanzados, incluyendo pruebas de varianza (ANOVA) y correlaciones de Pearson y Spearman. En el frontend, se implementaron **HTML, CSS y JavaScript**, asegurando una interfaz intuitiva y accesible. Además, la integración de inteligencia artificial generativa facilita la interpretación de los resultados y la generación de recomendaciones personalizadas para la organización, sin la necesidad de software costoso o infraestructura especializada.

Este estudio emplea un enfoque cuantitativo con un diseño descriptivo-comparativo transversal (Hernández Sampieri *et al.*, 2014). Se trabajó con una muestra de 86 de los 91 empleados del centro de rehabilitación integral y psicológica, lo que representa un 94.5% del total de la población. Este porcentaje de participación es alto y cumple con los requisitos para obtener inferencias estadísticas válidas, ya que supera el mínimo recomendado del 80% en estudios con poblaciones pequeñas y evita problemas de sesgo por falta de representatividad (Manterola y Otzen, 2015).

La recolección de datos se llevó a cabo mediante el MBI-HSS, complementado con variables sociodemográficas como edad, área de trabajo, estado civil, género, nivel educativo y antigüedad laboral. Estos datos permi-

**Tabla 1.** Subescalas del MBI-HSS.

| Subescala             | Código | Ítems                         | Número de ítems | Puntaje por ítem | Puntaje por subescala | Indicios de Burnout |
|-----------------------|--------|-------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| Agotamiento emocional | EE     | 1, 2, 3, 6, 8, 13, 14, 16, 20 | 9               | De 0 a 6         | De 0 a 54             | Más de 26           |
| Despersonalización    | DP     | 5, 10, 11, 15, 22             | 5               | De 0 a 6         | De 0 a 30             | Más de 9            |
| Realización personal  | PA     | 4, 7, 9, 12, 17, 18, 19, 21   | 8               | De 0 a 6         | De 0 a 48             | Menos de 34         |

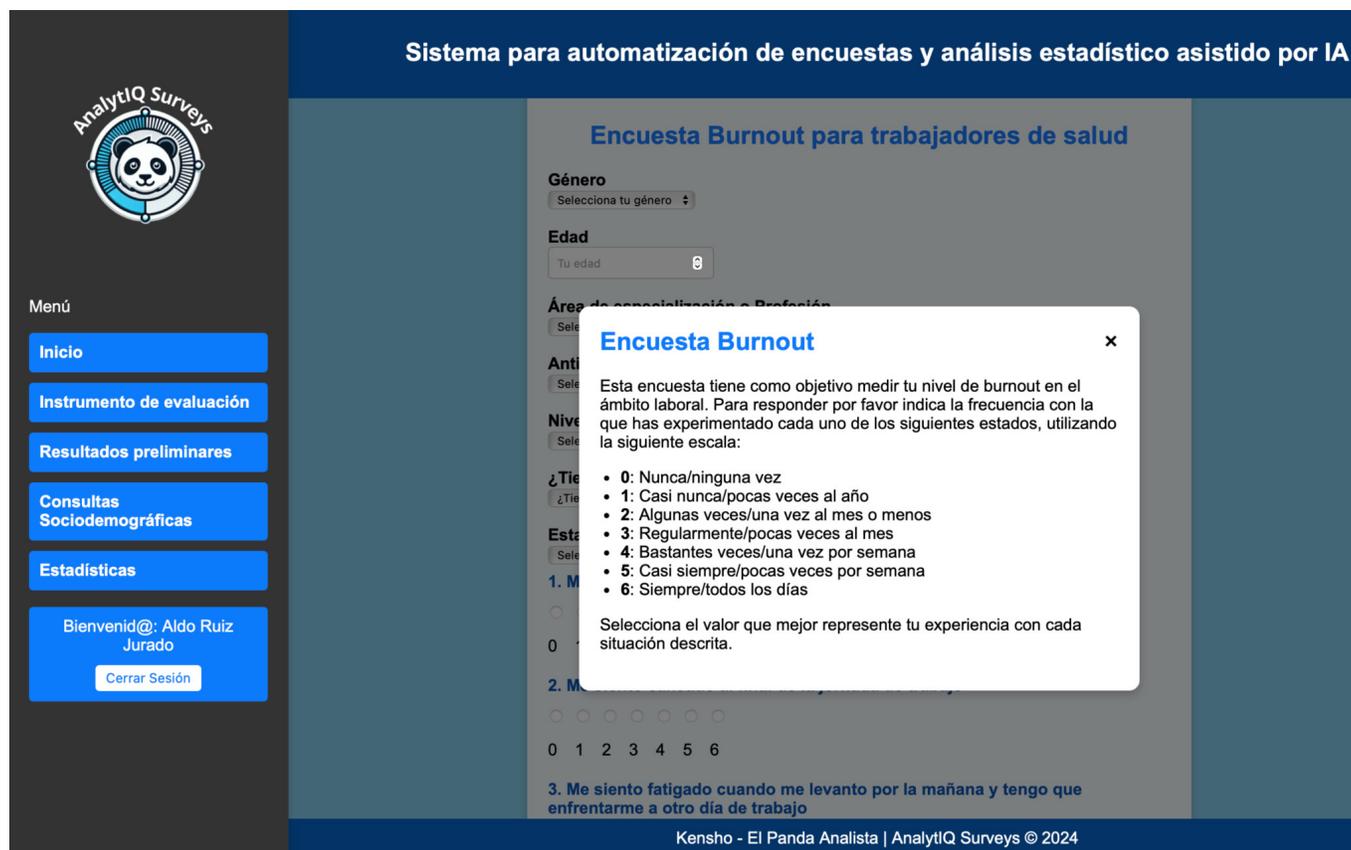


Figura 1. Pantalla principal AnalytIQ Surveys

tieron segmentar los análisis e identificar los grupos con mayor tendencia a desarrollar este síndrome.

El proceso metodológico abarcó cinco fases principales, desde la recopilación de datos hasta la generación de recomendaciones apoyadas en inteligencia artificial generativa. En la **Figura 2**, se detallan las tareas clave realizadas en cada etapa.

### Recopilación de datos

En esta fase, se obtuvo el consentimiento informado digital de cada participante antes de responder el cuestionario. Para ello, se implementó un módulo de firma digital en la plataforma diseñada específicamente para este estudio.

Tabla 2. Valoración de los niveles de Burnout

| Subescala             | Bajo      | Medio      | Alto (Indicios de Burnout) |
|-----------------------|-----------|------------|----------------------------|
| Agotamiento emocional | De 0 a 18 | De 19 a 26 | De 27 a 54                 |
| Despersonalización    | De 0 a 5  | De 6 a 9   | De 10 a 30                 |
| Realización personal  | De 0 a 33 | De 34 a 39 | De 40 a 56                 |

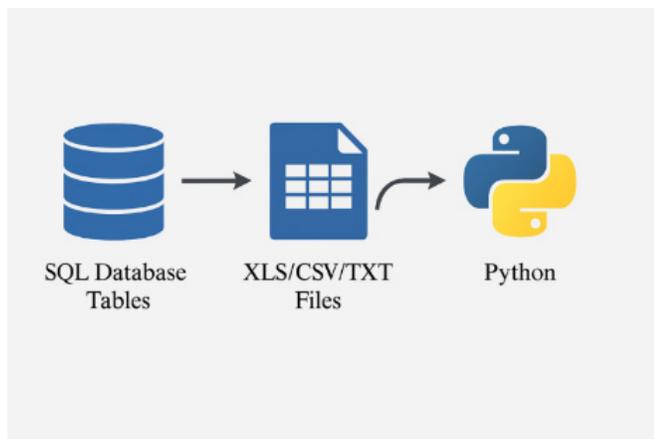
La captura de firma se realizó mediante un canvas HTML5, que permitió a los participantes dibujar su firma en pantalla. La firma fue convertida a imagen PNG utilizando `canvas.toDataURL()` y enviada mediante AJAX y Fetch API a un script en PHP, que procesó y almacenó los datos.

Para la generación del consentimiento firmado, se utilizó la librería FPDF en PHP, la cual permitió incrustar el texto del consentimiento informado junto con la firma del participante. La firma fue cargada dinámicamente en el PDF como una imagen en base64, asegurando su correcta visualización en el documento final.

El sistema generó un archivo PDF personalizado para cada participante, accesible mediante un enlace enviado por API de mensajería, facilitando su consulta y almacenamiento.

La recolección del consentimiento informado es un paso fundamental en estudios que involucran datos personales y aspectos de salud mental (Pico et al., 2022), ya que garantiza el respeto a la autonomía de los participantes y el cumplimiento de principios éticos en la investigación (Resnik, 2020). En el contexto del burnout, este procedimiento es clave para que los empleados comprendan los objetivos del estudio, los beneficios





**Figura 3.** Diagrama de preprocesamiento de datos.

mediante técnicas de codificación, facilitando su integración en el software estadístico. Estas acciones permitieron estructurar y optimizar los datos para su análisis, asegurando coherencia y precisión en los resultados.

### Análisis y validación

Antes de realizar los análisis comparativos, fue necesario evaluar la homogeneidad de varianza debido a la desproporción en el tamaño de los grupos de interés (66 mujeres y 20 hombres). Dado que la validez del ANOVA depende de este supuesto, se aplicó la prueba de Levene, que permite determinar si la dispersión de los datos es similar entre las categorías analizadas. Esta prueba es especialmente relevante en estudios con tamaños de muestra desiguales, ya que una varianza heterogénea podría invalidar los resultados del ANOVA y requerir pruebas alternativas.

Un valor  $p > 0.05$  en la prueba de Levene indica que no hay diferencias significativas en la varianza de los grupos, lo que permite asumir homogeneidad y proceder con el ANOVA sin ajustes adicionales. Por el contrario, si  $p < 0.05$ , se requerirían pruebas alternativas como Brown-Forsythe o Welch para corregir la heterogeneidad.

Los resultados obtenidos confirmaron la homogeneidad de varianza en todas las dimensiones evaluadas:

**Agotamiento Emocional** →  $p = 0.937$  (No hay diferencias significativas en la varianza).

**Despersonalización** →  $p = 0.771$  (No hay diferencias significativas en la varianza).

**Realización Personal** →  $p = 0.187$  (No hay diferencias significativas en la varianza).

Dado que todos los valores  $p > 0.05$ , se confirmó la viabilidad del ANOVA sin necesidad de pruebas alternativas.

### Análisis estadístico y validación de resultados

En esta fase, los datos fueron analizados mediante técnicas de estadística descriptiva e inferencial. Se aplicaron los siguientes procedimientos:

- Medidas de tendencia central y dispersión (media, mediana, desviación estándar) para describir la distribución de las respuestas.
- Análisis de varianza (ANOVA) para identificar las diferencias significativas en las dimensiones del burnout entre grupos.
- Correlaciones de Spearman y Pearson (según la normalidad de los datos) para evaluar la relación entre variables sociodemográficas y las dimensiones del burnout.

Para garantizar la precisión y confiabilidad de los cálculos, se realizaron validaciones comparativas con Minitab, un software de referencia en estadística. Se encontró una alta consistencia entre los valores obtenidos con AnalytIQ Surveys y los de Minitab, lo que confirma que la metodología empleada es equivalente a las mejores prácticas en investigación estadística (**Figura 4**).

Esta validación permitió detectar posibles desviaciones y asegurar la precisión de los resultados brindando mayor confianza en la interpretación de los hallazgos. La comparación entre ambas herramientas demostró que AnalytIQ Surveys genera resultados estadísticos robustos y confiables, presentando una alternativa viable a software comercial de análisis de datos.

### Recomendaciones personalizadas mediante integración de IA generativa

Finalmente, se implementó un modelo de inteligencia artificial generativa en el sistema, el cual fue entrenado para interpretar los resultados almacenados en la base de datos y generar recomendaciones estratégicas. A través de un procesamiento avanzado de lenguaje natural (PLN) y análisis contextual, la IA identificó patrones en los datos y estructuró sugerencias alienadas con los hallazgos del estudio.

Se diseñó una matriz de recomendaciones basada en IA. Que permitió analizar tendencias y proporcionar estrategias específicas para mitigar el burnout en la organización.

## ANALYTIQ SURVEYS

## MINITAB

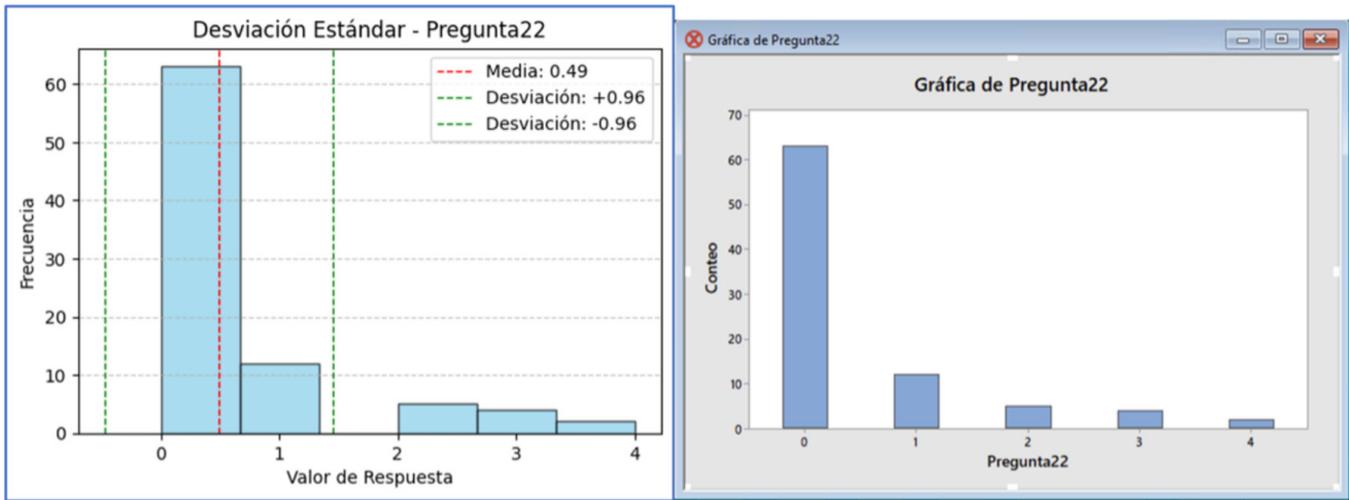


Figura 4. Comparativo gráfica desviación estándar - AnalytIQ Surveys vs Minitab.

### Resultados y discusión

Posterior a la aplicación del Maslach Burnout Inventory-HSS (MBI-HSS) y el análisis de los datos recopilados mediante la metodología propuesta, se obtuvieron hallazgos que evidencian patrones diferenciados de agotamiento emocional, despersonalización y realización personal en los empleados evaluados.

La combinación de métodos estadísticos descriptivos como media, mediana y desviación estándar y estadísticos inferenciales como el análisis de varianza (ANOVA) y correlaciones de pearson y spearman, permitió identificar diferencias significativas en la manifestación del burnout, considerando variables sociodemográficas como género, estado civil, nivel educativo y experiencia laboral. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y su discusión en relación con estudios previos sobre el tema.

#### Relevancia del análisis de estadística descriptiva

Los resultados obtenidos en el estudio revelan diferencias significativas en las dimensiones del burnout entre hombres y mujeres, lo que confirma la importancia de un análisis con enfoque de género en el contexto laboral de los servicios de salud.

Estos hallazgos se resumen en la **Figura 5**, que presenta los puntajes promedio de hombres y mujeres en cada una de las tres subescalas del burnout (agotamiento emocional, despersonalización y realización personal), proporcionando una visión global de las diferencias identificadas.

En la subescala de agotamiento emocional, los puntajes promedio indicaron niveles medios-altos, con una

media de 23.63 en mujeres y 20.15 en hombres. Esto sugiere que las trabajadoras experimentan mayor desgaste emocional, posiblemente relacionado con una percepción de carga laboral más alta, tanto en el ámbito profesional como en responsabilidades personales y roles en la sociedad (Firew *et al.*, 2025).

En cuanto a la despersonalización, los hombres obtuvieron un puntaje ligeramente superior (5.7) en comparación con las mujeres (5.091), aunque ambos grupos se encuentran en niveles bajos. Si bien la desconexión emocional no es predominante en la muestra analizada, estos resultados sugieren que los hombres podrían ser más propensos a desarrollar este componente del burnout.

Por otro lado, en la realización personal, los hombres alcanzaron un puntaje promedio de 38.4, mientras que en las mujeres fue 31.97, mostrando una diferencia estadísticamente significativa ( $p = 0.00037$ ). Este hallazgo, obtenido mediante una prueba t de Student para muestras independientes, indica que los hombres perciben mayores niveles de logro y satisfacción en el trabajo, mientras que las mujeres pueden experimentar una menor sensación de efectividad profesional (Noll *et al.*, 2023).

Esta diferencia podría explicarse desde varios enfoques. Previo a la inserción en el campo laboral, las mujeres tienden a requerir mayor aprobación de figuras de autoridad para la elección de su carrera universitaria, en contraste con los hombres, quienes muestran mayor autonomía en esta decisión. Esto refleja la persistencia de normas socioculturales que influyen en la percepción del logro profesional desde etapas tempranas (Álvarez *et al.*, 2022).

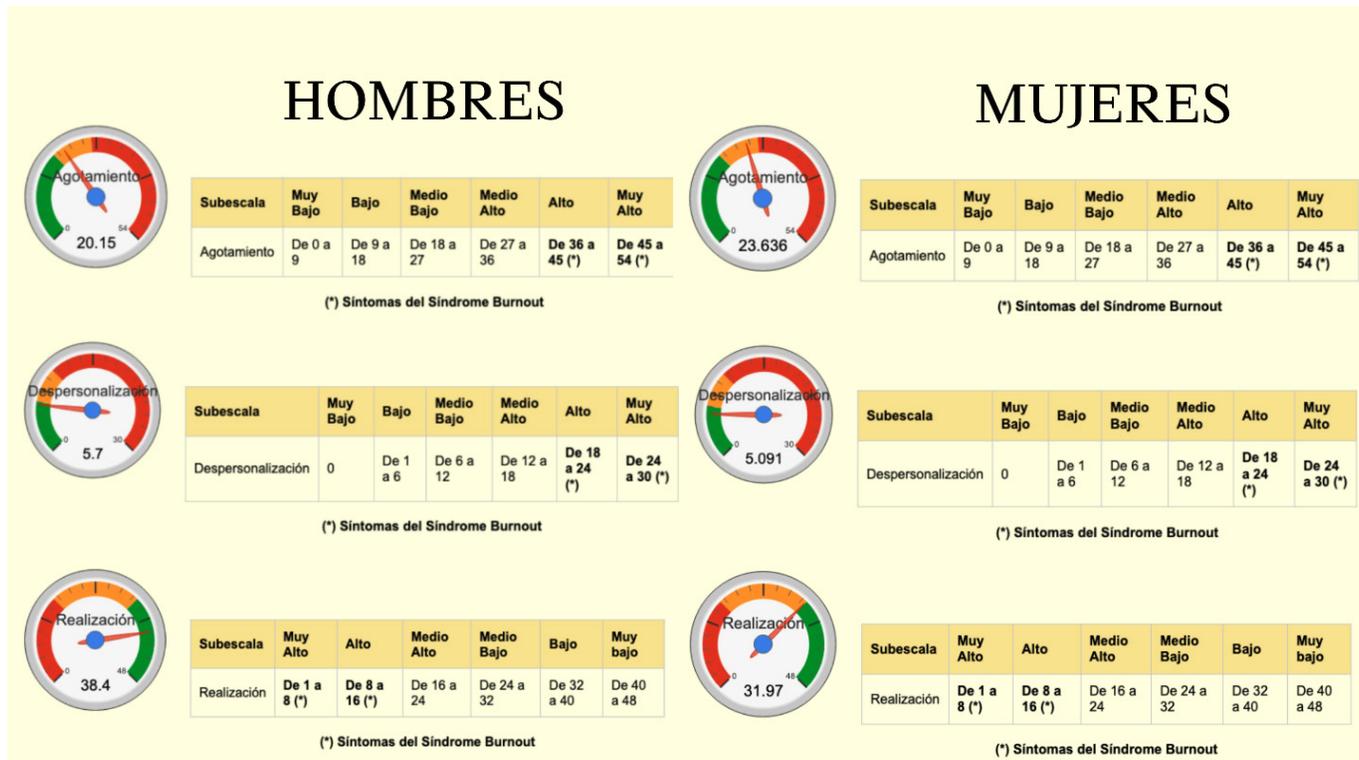


Figura 5. Subescalas burnout en relación al sexo.

Adicionalmente, las mujeres suelen enfrentar mayores cargas de trabajo no remunerado, como responsabilidades domésticas y de cuidado, lo que puede afectar su percepción de éxito profesional al dividir su energía y tiempo entre múltiples exigencias (INEGI, 2023). La literatura también sugiere que las mujeres en entornos laborales experimentan mayores niveles de autoexigencia y síndrome del impostor, lo que reduce su percepción de éxito, incluso cuando desempeñan un rol profesional igual o superior al de sus compañeros varones (Vilchez *et al.*, 2023). Además, factores organizacionales, como una menor representación femenina en puestos de liderazgo (Hernández, 2024), la falta de reconocimiento o la presencia de sesgos de género en la retroalimentación laboral, pueden influir en su percepción de crecimiento y satisfacción en el trabajo.

**Relevancia del análisis de Estadística Inferencial**

Para evaluar la relación entre variables sociodemográficas y el burnout, se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) y correlaciones de Spearman y Pearson. Los principales hallazgos fueron los siguientes:

**ANOVA: nivel de fatiga en relación al género**

El género mostró una correlación negativa significativa con la percepción de energía en el trabajo ( $p = 0.0466$ ), como se muestra en la **Figura 6**, lo que indica que las

mujeres reportan mayores niveles de fatiga al despertar por la mañana. Este hallazgo es consistente con estudios previos que sugieren que las mujeres pueden experimentar una mayor carga física y mental desde el inicio del día (Fernandez *et al.*, 2014), lo que afecta su nivel de energía y predisposición al trabajo.

Desde una perspectiva biopsicosocial, esta diferencia puede explicarse a través de factores fisiológicos, psicológicos y socioculturales. En términos biológicos, investigaciones han mostrado que las mujeres presentan una mayor prevalencia de trastornos del sueño, como insomnio y menor eficiencia del descanso, lo que

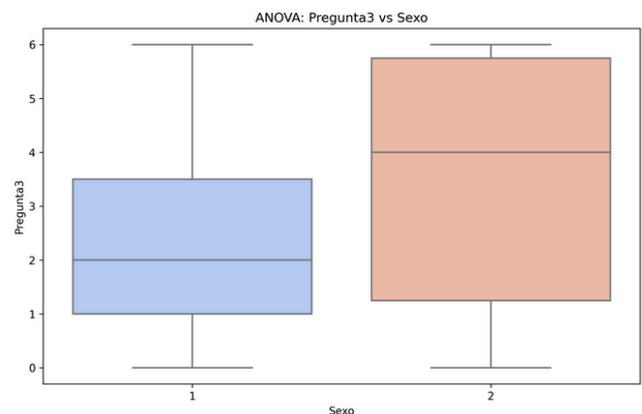


Figura 6. ANOVA – Relación de fatiga respecto al género (AnalytIQ Surveys)

podría deberse a diferencias hormonales asociadas al ciclo menstrual, el embarazo o la menopausia (Kiss *et al.*, 2024). Esto sugiere que el impacto de la calidad del sueño sobre la fatiga matutina puede ser mayor en mujeres que en hombres.

Desde un enfoque psicológico y sociocultural, estudios han señalado que las mujeres suelen enfrentar mayores cargas de trabajo no remunerado, como las responsabilidades domésticas y de cuidado (Huang *et al.*, 2023). Esta “doble jornada laboral” puede generar una acumulación de estrés y una reducción en el tiempo de descanso efectivo, lo que contribuye a niveles más altos de fatiga al despertar. Además, el sesgo de género en los entornos laborales, donde las mujeres suelen percibir una mayor presión para demostrar su competencia y asumir múltiples roles simultáneamente, puede generar un desgaste mental adicional antes incluso de iniciar su jornada laboral (Lott, 2023).

Estos hallazgos subrayan la importancia de implementar estrategias organizacionales que consideren el impacto diferencial del burnout en mujeres, promoviendo políticas de conciliación laboral-familiar, acceso a recursos de salud mental y estrategias para mejorar la calidad del descanso en trabajadoras con alta carga laboral.

**Correlación de Spearman entre género y agotamiento emocional**

Para identificar relaciones entre variables en la presente investigación, se utilizó la correlación de Spearman en la plataforma diseñada para este estudio, una técnica estadística no paramétrica que mide la asociación entre dos variables ordinales o continuas (Tabla 3).

En este análisis, se exploró la relación entre el género de los participantes (1 = Hombre, 2 = Mujer) y distintas dimensiones del burnout, medidas a través del MBI-

HSS. Se analizaron correlaciones con indicadores clave como agotamiento emocional, frustración laboral y percepción del impacto profesional, con el objetivo de comprender cómo el género influye en la experiencia del desgaste profesional (Figura 7).

Los hallazgos más relevantes indican que las mujeres tienden a reportar niveles más altos de frustración laboral ( $\rho = -0.436, p = 0.002$ ), lo que sugiere una mayor propensión al agotamiento emocional en comparación con los hombres. Asimismo, se encontró que los hombres reportan mayor calma al tratar problemas emocionales en el trabajo ( $\rho = -0.305, p = 0.004$ ), lo que podría indicar una mayor resiliencia en el manejo de situaciones laborales estresantes.

Además, se observó que las mujeres perciben un menor impacto positivo de su trabajo en la vida de los demás ( $\rho = -0.321, p = 0.003$ ), lo que sugiere una diferencia de género en la sensación de realización profesional. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar estrategias diferenciadas para la prevención del burnout, atendiendo las diferencias en la experiencia laboral entre hombres y mujeres.

**Correlación de Pearson: Relación entre género y dimensiones del MBI HSS.**

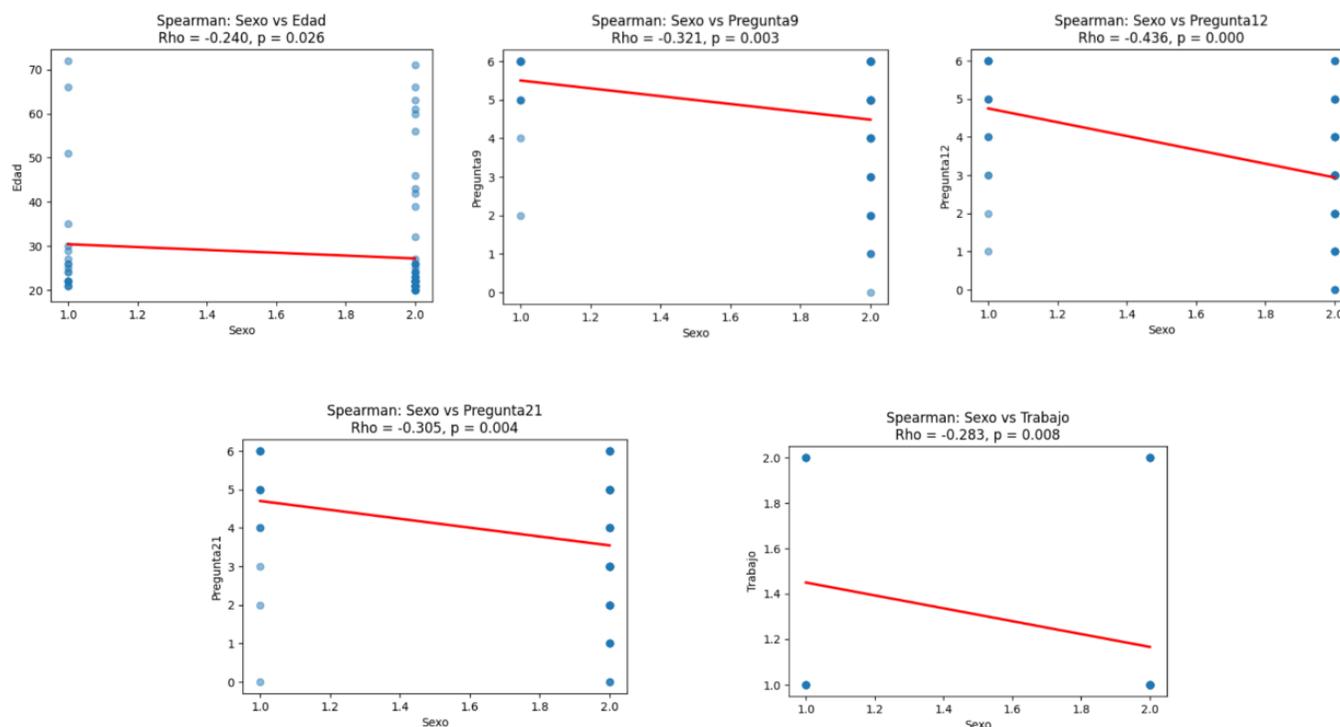
Se utilizó la correlación de Pearson para analizar la relación entre el género (1 = Hombre, 2 = Mujer) y las dimensiones del burnout en el Maslach Burnout Inventory (MBI-HSS) (Tabla 4).

Con base en los resultados se aprecia lo sig.:

- Las mujeres reportan mayor fatiga matutina ( $\rho = 0.215, p = 0.0466$ ), lo que indica un mayor desgaste emocional desde el inicio de la jornada.
- Los hombres se sienten con más energía en el trabajo

Tabla 3. Correlación de Spearman vs ítems 9, 12, 21, Edad, Trabajo.

| Variable 1 | Variable 2  | Spearman Rho ( $\rho$ ) | P-Value | Interpretación   |
|------------|---|-------------------------|---------|--|
| Sexo       | Edad  | -0.24                   | 0.026   | A mayor edad, menor tendencia a un género específico.  |
| Sexo       | Trabajo   | -0.283                  | 0.008   | El género tiene influencia en la ocupación laboral.  |
| Sexo       | Pregunta 9 (“Siento que estoy influyendo positivamente en la vida de los demás con mi trabajo”) | -0.321                  | 0.003   | Las mujeres pueden percibir menor impacto positivo en los demás con su trabajo en comparación con los hombres. |
| Sexo       | Pregunta 12 (“Me siento frustrado por mi trabajo”)  | -0.436                  | 0.002   | Las mujeres tienden a reportar mayor frustración laboral en comparación con los hombres.                       |
| Sexo       | Pregunta 21 (“En mi trabajo, trato los problemas emocionales con mucha calma”)                  | -0.305                  | 0.004   | Los hombres podrían reportar mayor capacidad para manejar problemas emocionales con calma que las mujeres.     |



**Figura 7.** Gráficas correlación Spearman sexo vs ítems 9,12, 21, Edad, Trabajo.

**Tabla 4.** Correlación de Pearson vs ítems 3, 9, 12 y 21

| Ítem | Pearson | Valor p   | Subescala             | Texto del ítem   | Análisis   | Interpretación   |
|------|---------|-----------|-----------------------|--|--|--|
| 3    | 0.215   | 0.0466    | Agotamiento Emocional | Me siento fatigado cuando me levanto por la mañana y tengo que enfrentarme a otro día de trabajo | Las mujeres reportan niveles más altos de fatiga matutina, lo que sugiere un mayor desgaste emocional.   | Las mujeres pueden experimentar un mayor agotamiento emocional desde el inicio de su jornada laboral.  |
| 9    | -0.282  | 0.0086    | Realización Personal  | Siento que estoy influyendo positivamente en la vida de los demás con mi trabajo                 | Los hombres reportan niveles más altos de realización personal, sintiendo que impactan más en su entorno laboral.                                      | Los hombres perciben un mayor reconocimiento o impacto positivo en su trabajo, lo que podría estar relacionado con oportunidades de crecimiento. |
| 12   | -0.44   | 0.0000224 | Agotamiento Emocional | Me siento muy energético   | Los hombres se sienten con más energía en el trabajo en comparación con las mujeres.   | Las mujeres pueden estar experimentando una mayor sobrecarga física y mental, reflejada en menor energía laboral.                                |
| 21   | -0.282  | 0.0085    | Realización Personal  | En mi trabajo, trato los problemas emocionales con mucha calma                                   | Los hombres reportan manejar mejor los problemas emocionales en el trabajo, mientras que las mujeres pueden experimentar más dificultades emocionales. | Las mujeres podrían estar asumiendo una mayor carga emocional en el trabajo, lo que afecta su bienestar general.                                 |

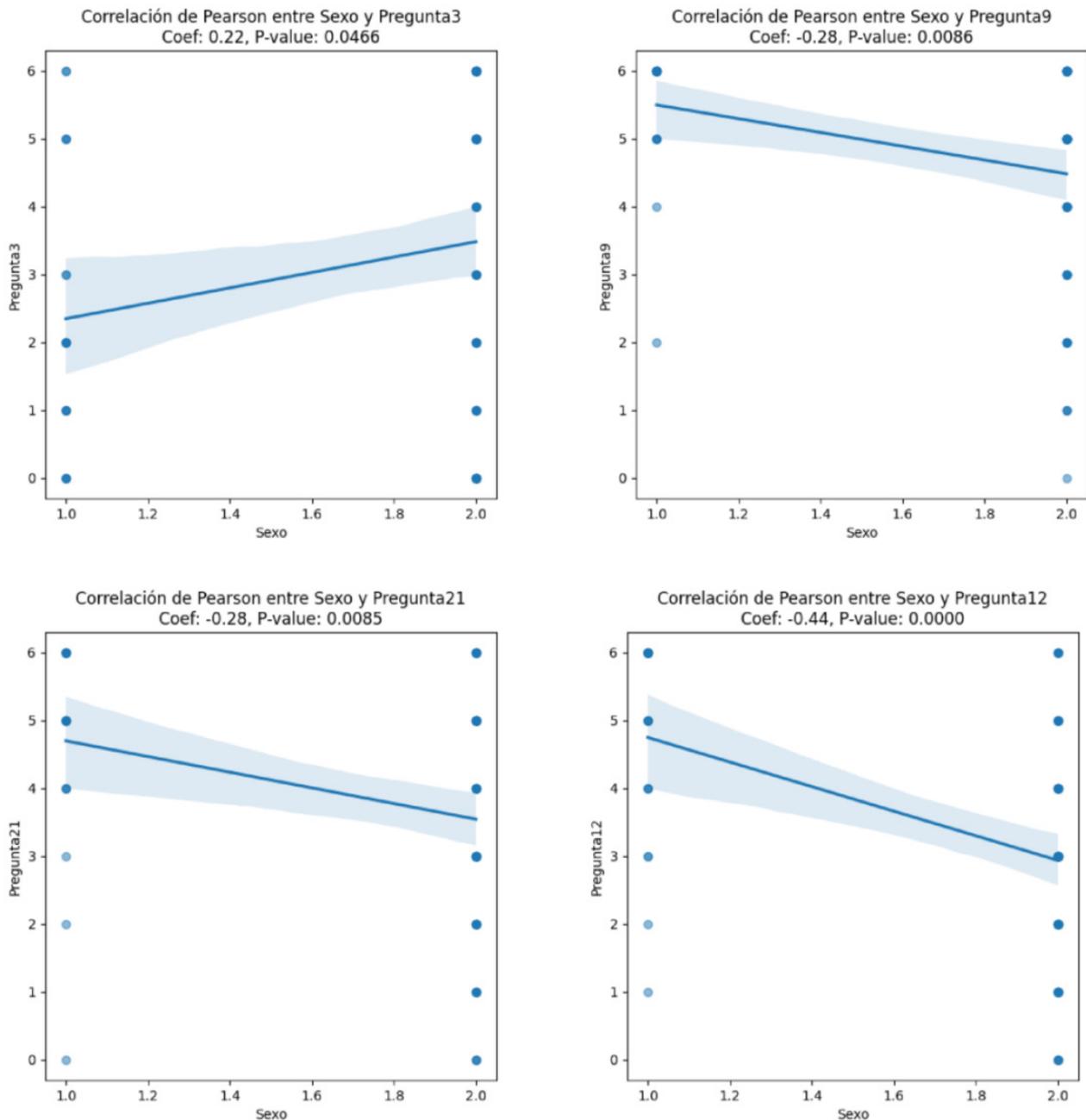
( $\rho = -0.44$ ,  $p = 0.0000224$ ), lo que sugiere una menor sobrecarga física y mental.

- Los hombres perciben mayor impacto positivo de su trabajo ( $\rho = -0.282$ ,  $p = 0.0086$ ), lo que podría estar relacionado con mayor reconocimiento laboral.
- Los hombres reportan manejar mejor los problemas emocionales ( $\rho = -0.282$ ,  $p = 0.0085$ ), mientras que las mujeres pueden experimentar una mayor carga emocional.

Estos resultados resaltan la importancia de estrategias diferenciadas para la prevención del burnout, considerando el impacto del género en la experiencia laboral.

Las gráficas de correlación de Paearson se presentan en la **Figura 8**.

La relación entre el género y la percepción de energía en el trabajo mostró una correlación negativa significativa con la pregunta me siento muy energético ( $r = -0.4401$ ,  $p < 0.05$ ), lo cual sugiere que las mujeres reportan sentirse menos energías en comparación con



**Figura 8.** Gráficas de correlación de Pearson vs ítems 3, 9, 12 y 21

los hombres. Este hallazgo podría estar relacionado con diferencias en la forma en que ambos géneros experimentan y regulan la fatiga en el contexto laboral. Estudios recientes han señalado que las mujeres, en comparación con los hombres, suelen experimentar una mayor carga mental en el trabajo, derivada de expectativas de desempeño más altas y una menor recuperación del estrés laboral debido a diferencias en la respuesta fisiológica al agotamiento (Ruiz *et al.*, 2023). Además, investigaciones en neurociencia han indicado que las diferencias hormonales pueden influir en la percepción de fatiga y en la capacidad de recuperación de la energía durante la jornada laboral.

## Implicaciones del estudio

El análisis de los datos obtenidos mediante el Maslach Burnout Inventory (MBI-HSS), en combinación con pruebas estadísticas como ANOVA y correlaciones de Spearman y Pearson, permitió identificar tendencias significativas en la manifestación del burnout según el género y otras variables laborales y sociodemográficas.

### El género como factor determinante en el burnout

Los resultados del estudio muestran que el sexo es un factor clave en la manifestación del burnout, evidenciando que mujeres y hombres experimentan este síndrome de manera diferenciada:

- **Mayor agotamiento emocional en mujeres:** Las trabajadoras reportaron niveles significativamente más altos de fatiga crónica y agotamiento emocional. Esto podría estar relacionado con una doble carga laboral (trabajo remunerado y responsabilidades domésticas), una menor percepción de autonomía y un mayor nivel de autoexigencia (INEGI, 2023).
- **Mayor despersonalización en hombres:** En contraste, los empleados varones mostraron una tendencia más alta a la despersonalización, reflejando un mecanismo de distanciamiento emocional como estrategia de afrontamiento ante el estrés laboral. Este comportamiento puede afectar la calidad de la atención brindada a los pacientes.
- **Diferencias en la percepción de energía laboral:** Se encontró una correlación negativa significativa entre género y percepción de energía en el trabajo ( $p < 0.05$ ), indicando que las mujeres reportan mayores niveles de fatiga al iniciar su jornada laboral. Este fenómeno podría deberse a factores fisiológicos y psicológicos (Faro *et al.*, 2016).
  - » Fisiológicos: Fluctuaciones hormonales a lo largo

del ciclo menstrual pueden afectar la calidad del sueño y la energía percibida.

- » Psicológicos: La carga mental derivada de la doble jornada (trabajo y hogar) y la autoexigencia laboral pueden aumentar el desgaste emocional.

Estos hallazgos sugieren que las estrategias organizacionales para mitigar el burnout deben considerar el impacto diferencial del género, promoviendo medidas equitativas que atiendan las necesidades específicas de cada grupo.

Si bien el género ha demostrado ser un factor determinante en la manifestación del burnout, no es el único elemento que influye en su desarrollo. Variables como la edad, la antigüedad en la organización, el nivel educativo y el área de trabajo también muestran correlaciones significativas con las distintas dimensiones del síndrome. Por ejemplo, los empleados con menor experiencia laboral tienden a reportar mayores niveles de agotamiento emocional, mientras que aquellos con más años en la organización presentan un mayor grado de despersonalización. Asimismo, el nivel educativo parece estar relacionado con la percepción de realización personal, ya que los trabajadores con estudios superiores tienden a reportar una mayor satisfacción en sus funciones. Estas diferencias sugieren que el burnout no puede atribuirse exclusivamente a un solo factor, sino que es el resultado de la interacción entre múltiples variables que configuran la experiencia laboral de cada individuo. Por lo anterior, un enfoque integral en la prevención del burnout debe considerar una combinación de factores individuales, sociodemográficos y estructurales para diseñar estrategias efectivas y equitativas de intervención.

A continuación se muestra en la **Tabla 5** la matriz de recomendaciones obtenidas mediante IA generativa.

## Conclusiones

Los resultados confirman que el burnout se manifiesta de manera diferenciada entre hombres y mujeres, lo que subraya la importancia de un enfoque de género en su evaluación. Las mujeres presentan niveles más altos de agotamiento emocional, lo que sugiere una mayor carga afectiva en su desempeño profesional, posiblemente vinculada a su predominancia en áreas de atención directa y a la carga de trabajo no remunerado fuera del entorno laboral. Por otro lado, los hombres muestran una mayor tendencia a la despersonalización, indicando que su estrategia de afrontamiento ante el estrés podría involucrar un mayor distanciamiento emocional.

El uso de la plataforma digital **AnalytIQ Surveys**

**Tabla 5.** Matriz de recomendaciones generadas mediante IA

| Área   | Factores de Riesgo Identificados   | Estrategias Administrativas para Mitigación (con Perspectiva de Género)   |
|--|--|---|
| Fisioterapia, Psicología, Enfermería y Terapia Ocupacional | Mujeres: Mayor carga emocional por expectativas de empatía y cuidado.<br>Hombres: Mayor tendencia a la despersonalización. | Turnos flexibles con equidad de género.   |
|  |  | Pausas activas diferenciadas según niveles de agotamiento emocional y carga familiar.   |
|  |  | Apoyo psicológico con perspectiva de género, enfocado en manejo de la empatía en mujeres y prevención de despersonalización en hombres. |
|  |  | Capacitación en estrategias de afrontamiento emocional adaptadas a cada género.   |
| Administración y Recepción                                 | Mujeres: Mayor estrés por multitarea y presión.<br>Hombres: Mayor distanciamiento emocional.                               | Automatización de procesos para reducir la carga operativa.   |
|  |  | Flexibilización de horarios o teletrabajo parcial, especialmente para mujeres con responsabilidades de cuidado.                         |
|  |  | Gestión del tiempo y reducción del estrés con enfoques personalizados por género.   |
|  |  | Pausas laborales estratégicas según carga emocional y operativa.  |
| Terapia de Lenguaje e Integración Social                   | Mujeres: Mayor desgaste emocional.<br>Hombres: Menor implicación emocional.  | Reducción de carga burocrática con digitalización.  |
|  |  | Rotación de actividades para evitar desgaste emocional en mujeres y fomentar involucramiento en hombres.                                |
|  |  | Formación en afrontamiento emocional, promoviendo balance entre compromiso emocional y autocuidado.                                     |
| Mantenimiento y Servicios Generales                        | Mujeres: Menor reconocimiento y subvaloración laboral.<br>Hombres: Mayor carga física.                                     | Reconocimiento equitativo y visibilidad del trabajo en ambos géneros.   |
|  |  | Condiciones ergonómicas mejoradas adaptadas a las necesidades físicas de cada trabajador.   |
|  |  | Descansos estratégicos según nivel de fatiga y actividad.   |
| Archivo y Documentación                                    | Mujeres: Mayor aislamiento y menor acceso a liderazgo.<br>Hombres: Menor interacción con el equipo.                        | Integración en equipos de trabajo para reducir aislamiento.   |
|  |  | Trabajo híbrido en digitalización, permitiendo equilibrio trabajo-vida personal.  |
|  |  | Capacitaciones en diversificación de funciones, promoviendo roles equitativos.  |
| Hidroterapia, Mecanoterapia y Electroestimulación          | Mujeres: Mayor desgaste físico por posturas forzadas.<br>Hombres: Mayor riesgo de lesiones musculoesqueléticas.            | Rotación de tareas para mitigar el impacto físico en ambos géneros.   |
|  |  | Incentivos por cumplimiento de protocolos de autocuidado.   |
|  |  | Pausas físicas programadas según nivel de esfuerzo reportado.   |

representó un avance significativo en la recopilación y análisis de datos. Su capacidad para realizar pruebas estadísticas avanzadas, como ANOVA y correlaciones de Pearson y Spearman, permitió obtener resultados detallados de manera eficiente y accesible. La integración de inteligencia artificial facilitó la interpretación de los hallazgos y la generación de recomendaciones estratégicas basadas en evidencia, destacando el potencial de las herramientas digitales para optimizar la evaluación del burnout y apoyar la toma de decisiones organizacionales de manera fundamentada. Sin embargo, este estudio deja

abiertas interrogantes para futuras investigaciones. Es fundamental explorar con mayor profundidad el impacto de la regulación emocional y la resiliencia según el género, así como la influencia de factores organizacionales como la cultura laboral y el acceso a redes de apoyo. También es necesario analizar si las estrategias actuales de prevención del burnout responden adecuadamente a las necesidades de cada grupo o si es necesario diseñar enfoques más personalizados y basados en evidencia.

Este estudio aporta un marco de referencia para comprender la relación entre género y burnout, pero aún que-

da camino por recorrer en la formulación de políticas organizacionales efectivas que promuevan la equidad y el bienestar en el entorno laboral.

## Referencias

Aguilar Hernández PA, Acosta Tzin JV, Raudales García EV, Andino Gonzalez P, Sarmiento Matute RE (2023). Factores de influencia en la calidad de vida laboral según la Teoría del Comportamiento Organizacional: análisis bibliométrico. <https://www.redalyc.org/journal/993/99376074006/html/>.

Armando Ortiz P, Burdiles P (2010). Consentimiento informado. *Revista Médica Clínica Las Condes* 21(4):644–652. doi:10.1016/S0716-8640(10)70582-4.

Armenta Hernández OD, Maldonado Macias AA, Barajas Bustillos MA, Realyvasquez Vargas A, Báez López YA (2021). Estado civil y síndrome de burnout en gerentes medios y superiores de la industria manufacturera mexicana. *Ergonomía, Investigación y Desarrollo* 3(1):35-47. doi:10.29393/EID3-3ECOAS00023.

Faro M, Sáez-Francás N, Castro-Marrero J, Aliste L, Fernández de Sevilla T, Alegre J (2016). Diferencias de género en pacientes con síndrome de fatiga crónica. *Reumatología Clínica* 12(2):72-77. doi:10.1016/J.REUMA.2015.05.007.

Fernández Felipe MC, Cruz Cantos MLdl, Gayoso Doldan M, Rodríguez Tupayachi S (2015). Carga mental en la mujer trabajadora: desigualdad de género y prevalencia. *Medicina y Seguridad del Trabajo* 61:18-33. doi:10.4321/S0465-546X2015000100003.

Firew T, Miranda M, Fray N, Gonzalez A, Sullivan AM, Cannone D, Schwartz JE, Karp JF, Chang BP, Shechter A (2025). Examining How Gender, Race/Ethnicity, and Clinical Roles Moderate the Association Between Sleep and Burnout. *JACEP Open* 6(1):100004. <https://doi.org/10.1016/J.ACEPJO.2024.100004>.

Hernández Sampieri, Fernández Collado, Baptista Lucio (2014). Metodología de la Investigación (6a ed.). McGraw Hill Interamericana.

Huang W, Hao L, Wu X, Yu X, Cui E, Leroux A (2023). Gender difference in “second-shift” physical activity: New insights from analyzing accelerometry data in a nationally representative sample. *SSM - Population Health* 24:101536. doi:10.1016/j.ssmph.2023.101536.

INEGI (2023). Trabajo no Remunerado de los Hogares. <https://www.inegi.org.mx/temas/tnrh/>.

Kiss O, Arnold A, Weiss HA, Baker FC (2024). The relationship between sleep and menstrual problems in early adolescent girls. *Sleep Science and Practice* 8:1-12. doi:10.1186/S41606-024-00111-W.

Lott Y (2023). Working longer with working-time flexibility: Only

when job commitment is high and family commitment is low? *Journal of Family Research* 35:372–392. doi:10.20377/jfr-852.

Manterola C, Otzen T (2015). Los Sesgos en Investigación Clínica. *International Journal of Morphology* 33(3):1156-1164. doi:10.4067/S0717-95022015000300056

Maslach C, Leiter M (1999). The Maslach Burnout Inventory Manual. [https://www.researchgate.net/publication/277816643\\_The\\_Maslach\\_Burnout\\_Inventory\\_Manual](https://www.researchgate.net/publication/277816643_The_Maslach_Burnout_Inventory_Manual).

Mohla C (2021). Impact of education level on occupational stress. *Abhigyan* 39(1):13-21. doi:10.56401/ABHIGYAN/39.1.2021.13-21.

Molero Jurado MdM, Pérez-Fuentes MdC, Gázquez Linares JJ, Barragán Martín AB (2018). Burnout in health professionals according to their self-esteem, social support and empathy profile. *Frontiers in Psychology* 9:424. doi:10.3389/fpsyg.2018.00424

Oprinca-Muja LA, Mohor CI, Oprinca GC, Cardoso R, Domnariu CD, Cristian AN, Băcilă C, Fleacă SR, Cristian A, Morar S (2025). Burnout Syndrome in forensic medicine and its association with vicarious trauma, posttraumatic stress syndrome and occupational stress. *International Journal of Legal Medicine* 139(3):1223-1237. doi:10.1007/s00414-024-03398-7.

Ozgur C, Li Y, Dou M, Rogers G. (2017). Selection of statistical software for data scientists and teachers. *Journal of Modern Applied Statistical Methods* 16(1):753-774. doi:10.22237/JMASM/1493599200.

Pico-Camacho AJ, Vega-Peña NV (2022). Communication in the informed consent. *Revista Colombiana de Cirugía* 37(4):554-562. doi:10.30944/20117582.2147.

Resnik D (2020). What is ethics in research & why is it important. [https://www.researchgate.net/publication/242492652\\_What\\_is\\_Ethics\\_in\\_Research\\_Why\\_Is\\_It\\_Important](https://www.researchgate.net/publication/242492652_What_is_Ethics_in_Research_Why_Is_It_Important).

Rudman A, Arborelius, L, Dahlgren A, Finnes A, Gustavsson P (2020). Consequences of early career nurse burnout: A prospective long-term follow-up on cognitive functions, depressive symptoms, and insomnia. *EClinicalMedicine*, 27. <https://doi.org/10.1016/J.ECLINM.2020.100565>

Ruiz D, Salazar Gómez J, Valdivia Rivera MJ, Huerta Mora I R (2023). Estrés laboral en relación con el desempeño laboral: un caso de estudio. <https://www.redalyc.org/journal/5608/560875871009/html/>.

Santamaría MD, Mondragon NI, Santxo NB, Ozamiz-Etxebarria N (2021). Teacher stress, anxiety and depression at the beginning of the academic year during the COVID-19 pandemic. *Global Mental Health* 8:e14. doi:10.1017/gmh.2021.14



# Polifarmacia e ingesta crónica de medicamentos antiinflamatorios no esteroideos en relación a hemorragia digestiva alta en pacientes mayores de 45 años

Polypharmacy and chronic intake of non-steroidal anti-inflammatory drugs in relation to upper gastrointestinal bleeding in patients over 45 years of age

Patricia Zárate Mediano<sup>1</sup>, Gerardo Vargas Nava<sup>2</sup>, Brenda Paullette Morales Hernández<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, Coordinación de Educación. Zacapu, Michoacán, México.

<sup>2</sup> Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, Departamento de Urgencias. Zacapu, Michoacán, México.

<sup>3</sup> Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona con Medicina Familiar No.2, Departamento de Enseñanza. Zacapu, Michoacán, México.

## Historial

Manuscrito recibido: 16 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 23 de junio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Brenda Paullette Morales Hernández

bpmh13@hotmail.com

ORCID: 0000-0002-0632-2815

## Resumen

La polifarmacia e ingesta crónica de medicamentos antiinflamatorios no esteroideos se consideran factores de riesgo para la hemorragia digestiva alta. En este trabajo se determinó la relación entre la polifarmacia e ingesta crónica de AINES con la hemorragia digestiva alta en pacientes mayores de 45 años mediante un estudio retrospectivo por endoscopia. Se analizaron variables clínicas y sociodemográficas mediante estadística descriptiva para asociación de variables  $X^2$  y *OR* (*Odds Ratio*), con valor de  $p < 0.05$ . Se revisaron 104 expedientes de pacientes, detectándose en 67 de ellos hemorragia no variceal (64.4%) y variceal en 37 (35.6%), en asociación con tabaquismo, alcoholismo, cirrosis hepática, polifarmacia e ingesta crónica de AINES. Evitar dichos factores es fundamental para disminuir la morbimortalidad.

**Palabras clave:** Hemorragia gastrointestinal; polifarmacia; antiinflamatorios no esteroideos.

## Abstract

Polypharmacy and chronic intake of non-steroidal anti-inflammatory drugs are considered risk factors for upper gastrointestinal bleeding. This study determined the relationship between polypharmacy and chronic intake of NSAIDs with upper gastrointestinal bleeding in patients over 45 years old through a retrospective endoscopy study. Clinical and socio-demographic variables were analyzed using descriptive statistics for  $X^2$  variable association and OR (Odds Ratio), with a  $p$ -value  $< 0.05$ . A total of 104 patient files were reviewed, detecting non-variceal bleeding in 67 of them (64.4%) and variceal bleeding in 37 (35.6%), associated with smoking, alcoholism, liver cirrhosis, polypharmacy, and chronic intake of NSAIDs. Avoiding these factors is essential to reduce morbidity and mortality.

**Keywords:** Gastrointestinal bleeding; polypharmacy; non-steroidal anti-inflammatory drugs.

## Introducción

La hemorragia digestiva alta (HDA) se presenta como un sangrado por lesión en el tracto digestivo por arriba del triángulo de Treitz (Hernández-Jerónimo *et al.*, 2022). Se clasifica de acuerdo a su etiología en hemorragia digestiva alta de origen variceal y no variceal según sea la causa que la ocasiona y según el tiempo de evolución en aguda y crónica. La endoscopia es el método más apropiado para su diagnóstico (Otero *et al.*, 2020).

A nivel mundial la incidencia anual por HDA varía entre 50 y 150 casos por 100,000 habitantes según los diferentes reportes, con una mortalidad que oscila entre 4 y 10% de los casos (Hernández *et al.*, 2021). Se presenta mayoritariamente en personas mayores de 65 años de edad y del sexo masculino (Pinto *et al.*, 2020). En México en forma anual se estima entre 80 a 150 casos por cada 100,000 habitantes, con una mortalidad entre 4 y 9% (Cuartas-Agudelo *et al.*, 2020). sin embargo, exis-

te literatura que indica que podría abarcar desde 2 hasta un 15% (Jáquez-Quintana, 2021).

Etiológicamente, la HDA se puede clasificar como secundaria a patología variceal o no variceal. En el primer caso, la hemorragia se produce por lesiones sangrantes que a su vez son complicaciones de la hipertensión portal (HTP), siendo más severas y de pronóstico más sombrío (Echeverría *et al.*, 2020). En este padecimiento el alcoholismo y la cirrosis hepática se consideran los principales factores de riesgo (Díaz-Benítez *et al.*, 2021).

Dentro del grupo de la HDA no variceal, la causa más frecuente (37-50%) se debe a úlcera péptica (Poño *et al.*, 2024). Este tipo de hemorragia puede ser de origen duodenal o gástrica, siendo las duodenales las más frecuentes y secundaria a la toma de medicamentos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) e inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina que inhiben la agregación plaquetaria (Abdo-Francis *et al.*, 2020), así como a la presencia de *Helicobacter pylori*, la esofagitis (4%), síndrome Mallory-Weiss (3%), neoplasias (19%) y angiodisplasias (2%) (Chimbaco *et al.*, 2014).

El pronóstico dependerá de las comorbilidades y la edad del paciente. El hecho de ser mayor a 60 años aumenta el riesgo de hemorragia variceal hasta en 1.6 veces, mientras que el uso de antiagregantes plaquetarios incrementa el shock hemorrágico en 3.4 veces, 3.5, los anticoagulantes 2 y los AINEs 1.7 (Rațiu *et al.*, 2022). El cuadro clínico es muy preciso, se deberá sospechar de HDA en todo paciente con algún grado de hematemesis y/o la presencia de melena, para la cual es necesario haber presentado un sangrado gastrointestinal de 50-100 mililitros (Rodríguez-Rojas *et al.*, 2021). Para el tratamiento, la endoscopia servirá no solo para emitir un diagnóstico, sino para mitigar el cuadro de hemorragia. Dicho estudio cuenta con una sensibilidad del 98% y especificidad del 30% al 100%, beneficiándose más aquellos con duración menor de 24 horas de haber iniciado con el sangrado (Martínez *et al.*, 2021).

La HDA es una comorbilidad frecuente en pacientes que ingresan al servicio de urgencias del Hospital General de Zona con Medicina Familiar No. 2, generando altos costos para su atención y tratamiento en el Instituto Mexicano del Seguro Social, por lo que el objetivo del presente estudio es determinar la relación entre la polifarmacia e ingesta crónica de AINES como principales factores de riesgo con la hemorragia digestiva alta en pacientes mayores de 45 años de edad atendidos en dicha unidad hospitalaria, con la finalidad de establecer estrategias preventivas y enfocadas en la atención de los principales factores de riesgo encontrados.

## Materiales y métodos

Se implementó un estudio observacional, transversal descriptivo y retrospectivo con una revisión de 143 expedientes clínicos en el Hospital General de Zona con Medicina Familiar No. 2 (HGZ/MF No. 2), del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) en Zacapu, Michoacán. Este trabajo fue evaluado y aprobado por los Comités de Ética en Investigación y de Investigación en Salud del IMSS con número de aprobación R-2023-1603-006.

El cálculo del tamaño de muestra se llevó a cabo aplicando la fórmula para población finita (utilizada cuando se conoce el total de unidades de observación que la integran), tomando en cuenta el total de pacientes atendidos en el servicio de urgencias con diagnóstico de hemorragia digestiva alta (HDA) confirmada por endoscopia temprana, realizada durante su estancia intrahospitalaria del 01 de marzo 2017 al 30 mayo 2022 (Poblano-Verástegui *et al.*, 2020). Como criterios de inclusión se tomaron en cuenta sujetos mayores de 45 años, de ambos sexos y con diagnóstico confirmado de HDA por endoscopia. Se excluyeron expedientes de pacientes no adscritos a dicha unidad hospitalaria. Se eliminaron aquellos con expedientes incompletos, con información no confiable, no veraz o incorrecta.

Se estableció una hoja de recolección de datos creada por el autor de donde se obtuvieron variables sociodemográficas como edad, sexo y estado civil, así como variables clínicas incluyendo antecedentes de alcoholismo y tabaquismo, infección o no por *H. pylori* y/o cirrosis hepática y variables paraclínicas como diagnóstico definitivo, estudios diagnósticos que se le realizaron, antecedente de ingesta crónica de AINEs (considerada como aquellos medicamentos con una ingesta mayor de tres meses) y/o polifarmacia (consumo de más de cinco medicamentos de forma simultánea por el mismo periodo de tiempo) y tiempo de ingesta de dichos fármacos (Subash *et al.*, 2020).

Se utilizó estadística descriptiva, los datos categóricos se reportaron en frecuencias y porcentajes (%) y para la asociación entre variables categóricas el estadístico de prueba no paramétrico  $\chi^2$  (Chi cuadrada), así como también se calculó el OR (*Odds Ratio*) con su respectivo intervalo de confianza al 95%. Se estableció la diferencia estadísticamente significativa con p valor <0.05. Los datos recabados se capturaron en una base de datos y se analizaron en el programa computacional SPSS versión 23.0 para Windows.

## Resultados

Se revisaron un total de 143 expedientes de pacientes con HDA confirmada por endoscopia y atendidos en el servicio de urgencias del HGZ/MF No.2, de los cuales se eliminaron 39 por no cumplir con criterios de selección, quedando un total del 104 expedientes. Predominaron pacientes del sexo masculino 53.8% (n= 56), del grupo de edad de 66 a 75 años 42.3% (n= 44), con estado civil casado 68.2% (n= 71), sin alcoholismo 57.7% (n=60) y tabaquismo activo 53.8% (n=56) (**Tabla 1**).

De los 104 expedientes clínicos, se documentó hemorragia digestiva alta de origen no variceal en 64.4% (n =67) y variceal 35.6% (n= 37).

Los factores de riesgo más frecuentes asociados para HDA de origen no variceal fue la ingesta crónica de AINES con un 60.6% (n= 63), seguido de la polifarmacia con un 58.7% (n= 61), mientras que para la de origen variceal fue cirrosis hepática 28.8% (n=30) y la polifarmacia 26.9% (n=28). Se encontró que existe mayor riesgo de padecer HDA en aquellos pacientes con ingesta crónica de AINES [8.531; IC95%: 2.531 - 28.761], polifarmacia [3.268; IC95%: 1.060-10.073] y presencia de *H. pylori* [1.607; IC95%: 1.377 – 1.874] (**Tabla 2**).

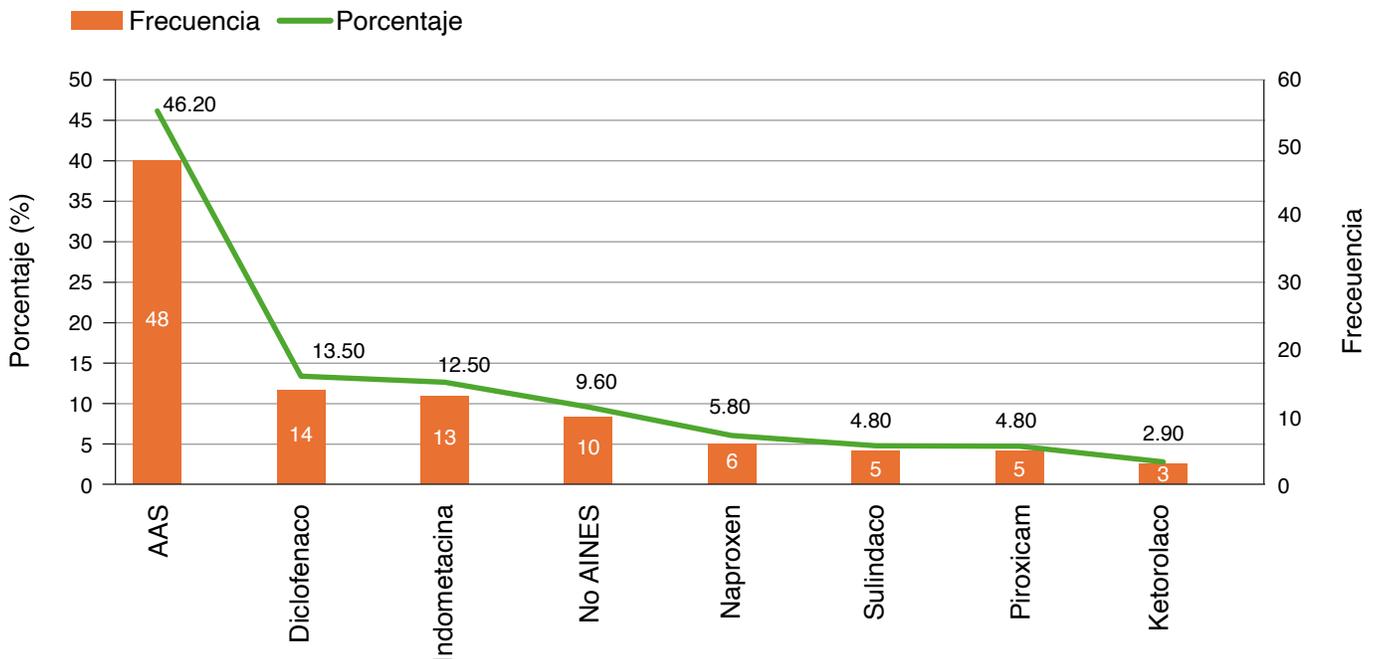
Dentro de los AINES consumidos, la ingesta de ácido acetilsalicílico y el diclofenaco fueron los fármacos para el control del dolor de mayor consumo (**Figura 1**).

Con respecto a la edad de los pacientes y su relación con el consumo crónico de AINES y la polifarmacia, se encontró que el grupo más afectado fue el de 66 a 75

**Tabla 1.** Variables sociodemográficas y clínicas de pacientes con hemorragia digestiva alta atendidos en el Hospital General de Zona No. 2 (n=104).

| Variable     |               | F (%)     |
|--------------|---------------|-----------|
| Sexo         | Femenino      | 48 (46.2) |
|              | Masculino     | 56 (53.8) |
| Edad (años)  | 45-55         | 12 (11.6) |
|              | 56-65         | 16 (15.4) |
|              | 66-75         | 44 (42.3) |
|              | 76-85         | 20 (19.2) |
|              | 86-95         | 8 (7.7)   |
|              | Más de 96     | 4 (3.8)   |
| Estado civil | Soltero(a)    | 3 (2.9)   |
|              | Casado(a)     | 71 (68.2) |
|              | Divorciado(a) | 3 (2.9)   |
|              | Viudo(a)      | 27 (26.0) |
| Alcoholismo  | Si            | 44 (42.3) |
|              | No            | 60 (57.7) |
| Tabaquismo   | Si            | 56 (53.8) |
|              | No            | 48 (46.2) |

F = Frecuencia; (%) = (Porcentaje)



**Figura 1.** Frecuencia del consumo de fármacos para el control del dolor en pacientes con hemorragia digestiva alta atendidos en el servicio de urgencias del HGZ/MF No. 2 (n=104); AAS = ácido acetilsalicílico; No AINES= No antiinflamatorios no esteroideos.

**Tabla 2.** Factores de riesgo asociados a la hemorragia digestiva alta en pacientes atendidos en urgencias del HGZ/MF No.2 (n=104).

| Variable              |    | HDA no variceal F (%) | HDA variceal F (%) | X <sup>2</sup> | Valor de p       | OR IC 95%(LI - LS)            |
|-----------------------|----|-----------------------|--------------------|----------------|------------------|-------------------------------|
| <i>H. pylori</i>      | Si | 6 (5.8)               | -                  | <b>3.516</b>   | <b>.061</b>      | <b>1.607 (1.377 - 1.874)</b>  |
|                       | No | 61(58.7)              | 37 (35.6)          |                |                  |                               |
| Tabaquismo            | Si | 31 (29.8)             | 25 (24.0)          | <b>4.351</b>   | <b>.037*</b>     | <b>.413 (.179 - .957)</b>     |
|                       | No | 36 (34.6)             | 12 (11.5)          |                |                  |                               |
| Alcoholismo           | Si | 20 (19.2)             | 24 (23.1)          | <b>11.973</b>  | <b>.001*</b>     | <b>.230 (.098 - .541)</b>     |
|                       | No | 47 (45.2)             | 13 (12.5)          |                |                  |                               |
| Cirrosis hepática     | Si | 1 (1.0)               | 30 (28.8)          | <b>72.165</b>  | <b>&lt;.001*</b> | <b>.004 (.000 - .030)</b>     |
|                       | No | 66 (63.5)             | 7 (6.7)            |                |                  |                               |
| Polifarmacia          | Si | 61 (58.7)             | 28 (26.9)          | <b>4.562</b>   | <b>.033*</b>     | <b>3.268 (1.060 - 10.073)</b> |
|                       | No | 6 (5.8)               | 9 (8.7)            |                |                  |                               |
| Ingesta crónica AINES | Si | 63 (60.6)             | 24 (23.1)          | <b>14.827</b>  | <b>&lt;.001*</b> | <b>8.531 (2.531 - 28.761)</b> |
|                       | No | 4 (3.8)               | 13 (12.5)          |                |                  |                               |

X<sup>2</sup>; \*Cifra estadísticamente significativa (p <0.05); F (%) = Frecuencia (Porcentaje);

*H. pylori* = *Helicobacter pylori*; OR = Odds Ratio; IC95% = Intervalo de Confianza al 95%; LI = Límite Inferior; LS = Límite Superior

años y con estado civil casado en ambos grupos, mientras que el grupo de divorciados y solteros fue el que menos consumo de AINES y polifarmacia presentaron (**Tabla 3**).

Las varices esofágicas fueron la causa más frecuente de HDA de origen variceal mientras que en la de origen no variceal fueron las úlceras duodenales (**Figura 2**).

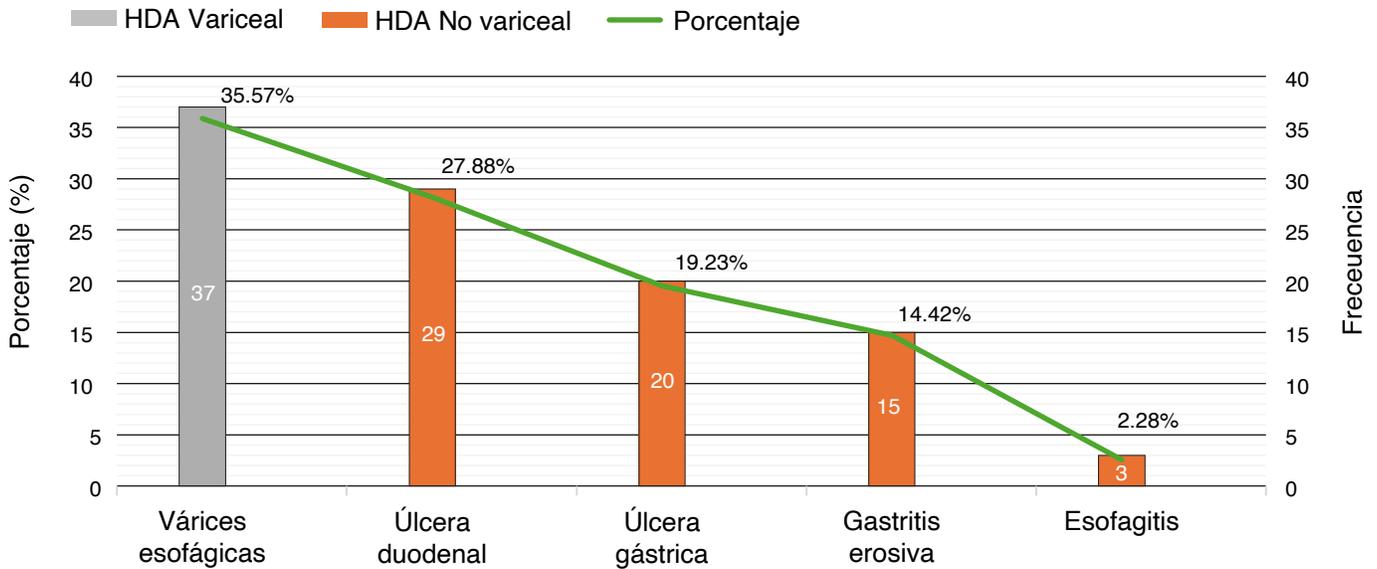
## Discusión

La hemorragia digestiva alta es un padecimiento que con frecuencia causa hospitalización en los servicios de urgencias; bien sea de origen no variceal o variceal como las úlceras pépticas y la rotura de várices esofágicas (Mellado y Mellado, 2022). Existen múltiples factores de riesgo, como el consumo crónico de AINES, la

**Tabla 3.** Polifarmacia e ingesta crónica de AINES por grupo de edad, sexo y estado civil de los pacientes con HDA atendidos en el servicio de urgencias del HGZ/MF No. 2 (n=104)

| Variable      | Polifarmacia F (%) |          | Valor de p | Ingesta crónica de AINES F (%) |           | Valor de p |
|---------------|--------------------|----------|------------|--------------------------------|-----------|------------|
| Edad (años)   | Si                 | No       | 0.002*     | Si                             | No        | 0.016*     |
| 45-55         | 6 (5.8)            | 6 (5.8)  |            | 6 (5.8)                        | 6 (5.8)   |            |
| 56-65         | 12(11.5)           | 4 (3.8)  |            | 15 (14.4)                      | 1 (1.0)   |            |
| 66-75         | 39 (37.5)          | 5 (4.8)  |            | 38 (36.5)                      | 6 (5.8)   |            |
| 76-85         | 20 (19.3)          | -        |            | 16 (15.4)                      | 4 (3.8)   |            |
| 86-95         | 8 (7.7)            | -        |            | 8 (7.7)                        | -         |            |
| Más de 96     | 4 (3.8)            | -        |            | 4 (3.8)                        | -         |            |
| Sexo          |                    |          | 0.966      |                                |           | 0.653      |
| Femenino      | 41 (39.4)          | 7 (6.7)  |            | 41 (39.4)                      | 7 (6.7)   |            |
| Masculino     | 48 (46.2)          | 8 (7.7)  |            | 46 (44.3)                      | 10 (9.6)  |            |
| Estado Civil  |                    |          | 0.035*     |                                |           | 0.717      |
| Soltero(a)    | 2 (1.9)            | 1 (1.0)  |            | 3 (2.9)                        | -         |            |
| Casado(a)     | 61 (58.7)          | 10 (9.6) |            | 60 (57.7)                      | 11 (10.5) |            |
| Divorciado(a) | 1 (1.0)            | 2 (1.9)  |            | 2 (1.9)                        | 1 (1.0)   |            |
| Viudo(a)      | 25 (24.0)          | 2 (1.9)  |            | 22 (21.2)                      | 5 (4.8)   |            |

Chi<sup>2</sup>; \*Cifra estadísticamente significativa (p <0.05); F (%) = Frecuencia (Porcentaje)



**Figura 2.** Causas más frecuentes de HDA de origen variceal y no variceal de los pacientes atendidos en urgencias del HGZ/MF No. 2 (n=104). La HDA de origen no variceal fue la más frecuente al ser la úlcera duodenal, gástrica, gastritis erosiva y esofagitis las causas más frecuentes de la misma.

polifarmacia o el alcoholismo (Olivarec-Bonilla *et al.*, 2020).

En el presente estudio, se analizaron un total de 104 expedientes de pacientes atendidos en el servicio de urgencias del HGZ/MF No. 2 con diagnóstico confirmado por endoscopia de hemorragia digestiva alta, con predominio en el sexo masculino, en rango de edad de 66 a 75 años, con estado civil casado(a), sin alcoholismo y con tabaquismo activo, encontrando que el tipo de hemorragia digestiva alta más frecuente fue el de origen no variceal 64.4% (n= 67), a diferencia del variceal 35.6% (n= 37). Olivarec-Bonilla *et al.* (2020) en Cuernavaca, Morelos, México, revisaron 129 expedientes de pacientes con HDA y endoscopia, documentando la HDA de origen no variceal en 82.9% (n= 107) y 17.0% (n= 22) con hemorragia variceal, siendo más frecuente de igual forma en el sexo masculino, con edad promedio de 63.4±15.86 años. Resultados similares a los de Chuecas *et al.* (2019) en un estudio realizado en Chile, establecieron una frecuencia para la HDA variceal entre 10 a 20% mientras que para la no variceal del 80%. Así mismo, se determinó que la HDA de origen no variceal fue más frecuente en hombres mayores de 60 años de edad, lo que muestra el incremento del riesgo de padecer HDA conforme aumenta la edad del paciente y que la combinación entre sexo masculino y edad son un fuerte factor de riesgo para dicho padecimiento, posiblemente debido a que los hombres fuman y consumen alcohol en mayor medida que las mujeres.

En el presente estudio, se determinó que existe un mayor riesgo de padecer HDA de origen no variceal

en aquellos pacientes con ingesta crónica de AINEs seguido de la polifarmacia e infección por *H. pylori*, mientras que en la de origen variceal debido a la polifarmacia e ingesta crónica de AINEs y se encontró relación estadísticamente significativa entre la HDA con el tabaquismo, el alcoholismo, la cirrosis hepática, polifarmacia e ingesta crónica de AINEs. Resultados análogos a los establecidos por Anzueles *et al.* (2021), quienes encontraron la presencia de *H. pylori* en el 86% de los casos, además de que los agentes exógenos como AINEs, alimentación inadecuada, consumo de alcohol y tabaquismo, se presentaron en el 63% de los pacientes.

Flores *et al.* (2019) refieren que el 57% de la población estudiada consumían algún tipo de AINE, relacionando en consecuencia dicho consumo con la úlcera péptica en el caso de HDA de origen no variceal e hipertensión portal en la variceal; resultados parcialmente similares a los de dicho estudio y a los de Roesch-Dietlen *et al.* (2021) quienes determinaron como principales factores de riesgo asociados a la HDA de origen variceal a la cirrosis hepática, la cual a su vez es causada principalmente por el consumo crónico de alcohol (47.8%) y enfermedad viral (28.5%), pese a que en el presente estudio no se realizó el análisis con las enfermedades virales; sin embargo, se logró establecer relación con la ingesta crónica de AINEs y el consumo de alcohol, que generan a su vez un daño hepático grave que puede desencadenar a futuro una cirrosis hepática en el paciente.

Por su parte, Pérez-Condori *et al.* (2023) realizaron un estudio a 197 pacientes de los cuales 65% fueron varones y 35% mujeres; el 19% presentó antecedente

de cirrosis y el 35% tuvieron antecedente de HDA. El diagnóstico endoscópico informó que el 64% de los pacientes tuvieron HDA no variceal y 36% HDA de origen variceal, siendo las principales causas de HDA no variceal la úlcera gástrica, úlcera duodenal y gastropatía erosiva, mientras que las causas de HDA de origen variceal fueron las várices esofágicas y várices gástricas. Con lo anterior, podemos establecer que los resultados encontrados en este reporte son comparables a los obtenidos en trabajos previos, ya que se observó que la HDA de mayor predominio fue la de origen no variceal, siendo la úlcera duodenal y úlcera gástrica las principales causantes, mientras que la cirrosis hepática lo fue en la de origen variceal, así como el notorio incremento de riesgo de HDA de hasta 8 veces en pacientes con ingesta crónica de AINES, de 3 con polifarmacia y 1.6 por infección de *H. pylori*.

En cuanto al consumo de fármacos para el control del dolor en los pacientes con hemorragia digestiva alta atendidos en el servicio de urgencias del HGZ/MF No. 2, se determinó mayor prescripción del AAS, seguido del diclofenaco e indometacina. Resultados parcialmente similares a los de Martínez *et al.* (2021) quienes mencionan al diclofenaco como el medicamento de mayor consumo, seguido del naproxeno; siendo importante mencionar que dichos resultados podrían variar con el nuestro, debido a que el AAS presentó mayor frecuencia de prescripción en dicha investigación, ya que es utilizado como cardioprotector por el alto índice de pacientes con hipertensión arterial en la unidad.

En contraparte con lo estipulado por Roca *et al.* (2021) quienes identificaron un porcentaje de polifarmacia del 17.2%, siendo principalmente los antihipertensivos, diuréticos e hipoglicemiantes los más recetados, mientras que de AINES fue el paracetamol, el ibuprofeno, el AAS y el naproxeno los de mayor consumo. Sin embargo, dicho estudio fue realizado a población adscrita de un consultorio médico de medicina familiar, donde la población que predomina es aquella con enfermedades crónico-degenerativas.

Contrario a lo encontrado por Ramírez *et al.* (2019) quienes obtuvieron una frecuencia de polifarmacia del 61.5%, ocupando los AINES una prescripción en el 59.5%, así mismo, refieren que la combinación de AINES más antiagregantes favorece más el riesgo de sangrado en el paciente, lo que pudiera justificar el alto índice de pacientes con HDA en el HGZ/MF No. 2 ya que al menos la mitad de la población cuenta con preprescripción de AAS.

Con respecto a la relación entre polifarmacia e ingesta crónica de AINES con la edad, sexo y estado civil, en

la presente investigación, se identificó que existe una relación estrecha entre la edad con la polifarmacia e ingesta crónica de AINES, siendo más frecuente conforme avanza la edad, mientras que también se encontró relación del estado civil con la polifarmacia, siendo más frecuente en los pacientes casados(as), posiblemente en relación al menor grado de estrés y ansiedad que presentan los pacientes solteros o divorciados a contraparte de los casados, siendo estos trastornos emocionales los posibles causantes de síntomas somáticos que generan pacientes de alta frecuencia a la consulta externa de medicina familiar y por ende un mayor riesgo de polifarmacia en el adulto mayor.

Existen diversos factores de riesgo para la HDA tanto de origen variceal como no variceal; sin embargo, es importante resaltar la clara relación entre el sexo masculino, edad avanzada y el estado civil casado con la polifarmacia e ingesta crónica de AINES, ya que teniendo en claro dichos factores, se podrán establecer estrategias preventivas en primer nivel de atención para disminuir la morbimortalidad de este padecimiento que genera grandes costos sanitarios al instituto para su atención.

La anamnesis para el adecuado uso de AINES y evitar la polifarmacia, con mayor énfasis en el adulto mayor es fundamental para una prescripción razonada de medicamentos de acuerdo a la edad del paciente y sus patologías asociadas, sugiriendo evitar el uso crónico de ellos. Sin olvidar, la posible relación entre el estado civil y la polifarmacia, en la relación a posibles trastornos mentales causantes de trastornos somáticos que generan pacientes multifrecuentadores a la consulta de medicina familiar.

Como limitantes en este estudio se obtuvo la falta de inclusión de algunas otras variables de estudio como el antecedente de enfermedades virales, por lo que sugerimos que en futuras investigaciones se tenga en consideración dichas patologías para ampliar la información al momento de realizar el análisis de los datos.

## Conclusiones

La HDA de origen no variceal se presenta en mayor frecuencia que la de origen variceal, predominando en pacientes del sexo masculino, de 66 a 75 años de edad, con estado civil casado y tabaquismo activo. La ingesta crónica de AINES, la polifarmacia y la infección por *H. pylori*, incrementan el riesgo de presentar HDA, así mismo, existe una clara relación con el tabaquismo, el alcoholismo, la cirrosis hepática, la polifarmacia y la ingesta crónica de AINES.

La polifarmacia ha mostrado relación con la edad y el estado civil, mientras que la ingesta crónica de

AINEs únicamente con la edad del paciente. Dentro de los principales fármacos consumidos para el control del dolor destacan el AAS y el diclofenaco, por lo que se recomienda limitar el uso de dichos medicamentos en pacientes de riesgo.

## Agradecimientos

Al personal de Salud del Hospital General de Zona con Medicina Familiar No. 2 de Zacapu, Michoacán.

## Referencias

- Abdo-Francis JM (2020). Hemorragia de tubo digestivo alto no variceal, ¿hay algo nuevo en nuestro arsenal? *Endoscopia* 32(1):14-15.
- Anzueles JB, Milian EJ, Betancourt L (2021). Caracterización clínico-histopatológica de la gastritis crónica. *Revista de Ciencias de Salud* 3(4):33-40.
- Chimbaco DF, Leal MA, González JP, Caviedes G (2014). Factores relacionados a hemorragia gastrointestinal alta en pacientes de la unidad de cuidados intensivos pese a la profilaxis. *Revista Médica de Risaralda* 20(1):9-13.
- Chuecas JA, Torres T, Cabezas G, Lara B (2019). Hemorragia digestiva alta. *Ars Medica Revista de Ciencias Médicas* 44(3):24-34.
- Cuartas-Agudelo YS, Martínez-Sánchez LM (2020). Aspectos clínicos y etiológicos de la hemorragia digestiva alta y sus escalas de evaluación. *México Médica* 33(3):9-20.
- Díaz-Benítez MI, Masi AL, Adorno C, Prieto I (2021). Caracterización endoscópica de pacientes con hemorragia digestiva alta en el servicio de Endoscopia Digestiva, Hospital Nacional de Itauguá, período (2020). *Cirugía Paraguaya* 42(2):8-12.
- Echeverría AS, González W, Polanco D, Ramírez J, Vargas K (2020). Sangrado digestivo alto: una emergencia médica. *Revista Ciencia y Salud Integrando Conocimientos* 4(4):144-152.
- Flores KL, López LE, Dávila LE, Alvarado SJ (2019). Hemorragia digestiva alta asociada a AINES. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento* 3(3):128-145.
- Hernández A, Le'Clere J, González M, Fernández PJ (2021). Factores pronósticos de mortalidad en pacientes graves con sangramiento digestivo alto no variceal. *Revista Cubana de Anestesiología y Reanimación* 20(1):e663.
- Hernández-Jerónimo JM, Matadamas-Zárate C, Cárdenas-Morales B, Azcona-Cruz MI, Matadamas-Hernández JC (2022). Hallazgos endoscópicos en pacientes con hemorragia de tubo digestivo alto y bajo en un hospital de segundo nivel. *Endoscopia* 34(3):70-73.
- Jáquez-Quintana JO (2021). Hemorragia de tubo digestivo alto. *Endoscopia* 33(1):6-8.
- Martínez G, Figueroa P, Toro J, García C, Csendes A. (2021). Conducta actual frente la hemorragia digestiva alta: Desde el diagnóstico al tratamiento, *Revista de Cirugía* 73(6):728-743.
- Martínez MC, Barrios AY, Pérez CN, Díaz MI (2021). Consumo de analgésicos no opioides en servicios hospitalarios no ambulatorios. *Revista Cubana de Farmacia* 54(1):1-8.
- Mellado J, Mellado JJ (2022). Variación estacional de la hemorragia digestiva alta. *Revista Cubana de Reumatología* 24(2):e798.
- Olivarec-Bonilla M, García-Montano AM, Herrera-Arellano A (2020). Riesgo de resangrado en hemorragia digestiva alta según la escala de Glasgow-Blatchford: herramienta de triaje. *Gaceta Médica de México* 156(1):502-508.
- Otero MJ, Figueredo LI, Figueredo C, Rosada Y, Polanco A (2020). Sangramiento digestivo alto, factores de riesgo asociados, Hospital Carlos Manuel de Céspedes, Enero 2017 a enero (2018). *Multimed* 24(1):130-139.
- Pérez-Condori LY, Loza-Munarriz CA, Alvarado-Malca AE, Espinoza-Rios JL, (2023). Generación de un test predictivo para el diagnóstico de la etiología de la hemorragia digestiva alta variceal. *Revista de Gastroenterología Perú* 43(3):228-235.
- Pinto C, Parra P, Magna J, Gajardo A, Berger Z, Montenegro C, et al. (2020). Hemorragia digestiva alta variceal y no variceal: mortalidad intrahospitalaria y características clínicas en un hospital universitario (2015-2017). *Revista Medicina de Chile* 148(1):288-294.
- Poaño CX, López MC, Rivera JA, López RD (2024). Hemorragia digestiva alta, etiología, diagnóstico y tratamiento: un artículo de revisión. *Polo de Conocimientos* 9(1):1128-1139.
- Poblano-Verástegui O, Bautista-Morales AC, Acosta-Ruiz O, Gómez-Cortez PM, Saturno-Hernández PJ (2020). Polifarmacia en México: un reto para la calidad en la prescripción. *Salud Pública de México* 62(6):859-867.
- Ramírez AR, Ramírez JF, Borrell JZC (2019). Polifarmacia e interacciones medicamentosas potenciales en el adulto mayor, una polémica en la prescripción. *Revista Cubana de Farmacia* 52(2):1-9.
- Rațiu L, Lupuşoru R., Popescu A, Sporea I, Goldis A, Danila M, et al. (2022). Acute gastrointestinal bleeding a comparison between variceal and nonvariceal gastrointestinal bleeding. *Medicine* 101(45):101:45.
- Roca IC, Ramos K, Martínez GJ, Pérez D, González MR (2021). Caracterización de la polifarmacia en adultos mayores de un consultorio médico urbano. *Multimed* 25(2):e2052.
- Rodríguez-Rojas DA, Portal LN, Duarte-Linares Y, Pozo LA, Figueroa PC, Hernández D (2021). Mortalidad intrahospitalaria en pacientes con sangrado digestivo alto. *Medicentro Electrónica* 25(2):178-195.
- Roesch-Dietlen F, González-Santes M, Sánchez-Maza Y, Díaz-Roesch F, Cano-Contreras AD, Amieva-Balmori M, et al. (2021). Influencia de los factores socioeconómicos y culturales en la etiología de la cirrosis hepática. *Revista de Gastroenterología de México* 86(1):28-35.
- Subash B (2020). Clinical profile and endoscopic findings in patients with upper gastrointestinal bleed attending a tertiary care hospital: a descriptive cross-sectional study. *Clinical Association of Nepal* 58(226):409-415.



# Efecto del proceso de extrusión del nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre sus propiedades fisicoquímicas y metabolitos secundarios

Effect of the extrusion process of the nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) on its physicochemical properties and secondary metabolites

Cynthia M. González Borja<sup>1</sup>, M. Galván Aguilar<sup>1</sup>, Rosa E. Pérez Sánchez<sup>1\*</sup>, Héctor E. Martínez Flores<sup>1</sup>, Daniel Val Arreola<sup>2</sup>, Ruy Ortiz Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>3</sup> Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## Historial

Manuscrito recibido: 28 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 13 de mayo de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Rosa E. Pérez-Sánchez

[rosa.perez@umich.mx](mailto:rosa.perez@umich.mx)

ORCID:

## Resumen

El proceso de extrusión de nopal representa una alternativa para conservarlo sin alterar su contenido de antioxidantes y flavonoides. En este trabajo se evaluó la extrusión del nopal en base fresca (BF) y cocido al vapor (CocV) sobre sus propiedades fisicoquímicas y contenido de metabolitos secundarios. Se utilizaron 4.0 kg de nopal (*O. ficus-indica*), distribuido en cuatro tratamientos (T): T1 o testigo, T2 nopal BF, T3 nopal CocV, and T4 nopal extruido BF y T4, nopal extruido CocV. Los valores mayores con respecto a los tratamientos fueron: T1 para fibra cruda (28.8%), T2 para ceniza (4.4%), T3 para la proteína cruda (13.0), T4 para metabolitos secundarios (flavonoides, fenoles) y actividad antioxidante. Los resultados muestran que el proceso de extrusión modifica diferencialmente sus propiedades, así como el contenido de metabolitos y antioxidantes.

**Palabras clave:** Contenido nutricional, antioxidantes, procesamiento de alimento.

## Abstract

The nopal (prickly pear cactus) extrusion process represents an alternative to preserve it without altering its antioxidant and flavonoid content. In this work, the extrusion of nopal on a fresh basis (BF) and steamed (CocV) was evaluated on its physicochemical properties and content of secondary metabolites. 4.0 kg of nopal (*O. ficus-indica*) was used, distributed in four treatments (T): T1 or control, T2 nopal BF; T3 CocV prickly pear; T3, BF and T4 extruded nopal, CocV extruded prickly pear. The highest values with respect to the treatments were: T1 for crude fiber (28.8%), T2 for ash (4.4%), T3 for crude protein (13.0), and T4 for secondary metabolites (flavonoids, phenols) and antioxidant activity. The results show that the extrusion process of nopal differentially modifies its properties, as well as the content of metabolites and antioxidants.

**Keywords:** Nutritional content, antioxidants, food processing.

## Introducción

Desde la antigüedad, el nopal (*Opuntia* spp) ha sido importante en la cultura mexicana como parte de la gastronomía, agricultura, medicina, entre otras áreas. Esta cactácea es endémica de México (FAO, 2018; SADER, 2020), alcanzando en el país una producción de 872.3 miles de toneladas (SIAP, 2023). Las principales especies cultivadas son *O. ficus-indica*, *O. joconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* (Argentel-Martínez *et al.*, 2024). De dichas especies se exportaron 63,387 toneladas (SIAP, 2023).

El nopal puede ser utilizado en la alimentación humana y animal debido a sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, prebióticas, hipoglucemiantes, e hipocolesterolémicas (Elshehy *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2022). Su impacto en la alimentación animal depende tanto de la disponibilidad de mano de obra, y su vida de anaquel (Ortiz *et al.*, 2022; Trindade *et al.*, 2023), por lo que diversos trabajos han evaluado alternativas y procesos que permitan conservar el nopal por más tiempo sin afectar sus propiedades (Osorio-Córdoba *et al.*, 2011; Ortiz *et al.*, 2022). El alto contenido de agua impide la conserva-

ción del nopal por largo tiempo después de su cosecha y, su bajo contenido de proteína implica la necesidad de enriquecerla con otros insumos, razón por la que se han implementado diversas técnicas de conservación (Pérez, 2021).

Uno de los procesos de conservación del nopal es la cocción al vapor, que mantiene su valor nutricional, la forma, consistencia, sabor y digestibilidad de la fibra (Achón *et al.*, 2018; Ortiz *et al.*, 2022). En cuanto al proceso de harinificación del nopal, este puede disminuir su digestibilidad y alterar sus componentes, lo que presenta una desventaja dentro de los procesos de conservación de esta cactácea (Elizondo, 2010).

Otras alternativas para la conservación de los alimentos son la peletización y la extrusión; para el primer caso, se compactan distintos ingredientes para formar “pellets” a través de presión, temperatura y humedad (Loo-Mendoza, 2016). Sin embargo, al someter al nopal a temperaturas mayores a 50 °C se pueden perder antioxidantes como los flavonoides (Pérez, 2021). La extrusión se aplica a los alimentos sensibles a altas temperaturas; e implica la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo; trae consigo ventajas tanto técnicas como de costo y calidad (Gutiérrez *et al.*, 2017). Con base en estos antecedentes, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del proceso de extrusión del nopal en base fresca y cocido al vapor sobre sus propiedades fisicoquímicas y contenido de metabolitos secundarios.

## Materiales y métodos

Se recolectaron 4.0 kg de nopal (*O. ficus-indica*), de una parcela perteneciente a la Unidad Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicada en el Municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O; aquí se cuenta con un clima templado, una temperatura promedio anual de 21 °C y humedad relativa de 62%, con lluvias en verano (INEGI, 2017).

La recolección de los cladodios se realizó en el período junio-julio del 2023 con una edad promedio de 3.5 meses. Una vez recolectados los cladodios, fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH en donde fueron procesados a través de la técnica de extrusión tanto en base fresca (BF) como cocidos al vapor (CocV) a 100 °C por 4 minutos. Con

los 4.0 kg de nopal se conformaron cuatro tratamientos (T): T1 o Testigo (n= 1.0 kg), nopal en BF; T2 (n= 1.0 kg), Nopal CocV; T3 (n= 1.0 kg), extrusión de nopal en BF y T4 (n= 1.0 kg), extrusión de nopal CocV.

Para el proceso de extrusión del nopal se utilizó 1.0 kg de nopal en BF (T3) y 1.0 kg de nopal CocV (T4). Los cladodios de nopal para el T3 y T4 se cortaron en porciones de aprox. 2 cm<sup>3</sup> para colocarlos en una licuadora (Oster-BLST4127) de uso doméstico y facilitar el molido. Una vez obtenida la pasta del nopal molido, esta se distribuyó en tres bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio desechables (Ekco®) de forma uniforme y con un espesor aproximado de 1 cm. Posteriormente, se colocaron en la deshidratadora (horno con ventilación forzada) con capacidad para 8.0 kg. La deshidratadora fue programada a 50 °C y a 20% de humedad.

Durante el proceso de deshidratación, la pasta de nopal se monitoreó cada 30 min hasta alcanzar una humedad de 35 a 37%, óptima para realizar el proceso de extrusión de acuerdo con las pruebas piloto previas. Una vez que se obtuvo la humedad ≤ 37% en la pasta de nopal se realizó el proceso de extrusión, utilizando para ello un molino manual de pellets específico para dicho proceso. Una vez obtenido el nopal extruido en BF, este se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevaron nuevamente a la deshidratadora hasta alcanzar una humedad entre 10 y 12% (DOF: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Para el proceso de extrusión del nopal CocV, primeramente, se preparó 1.0 kg de nopal en BF cortándolos en trozos de 2 cm<sup>3</sup>. Posteriormente, se sometieron a cocción a vapor a 100 °C por 4 min en una olla de uso doméstico (Vasconia®) con capacidad de 5 L, ello de acuerdo con la técnica establecida por Ortiz *et al.* (2022). Una vez transcurrido los 4 min de cocción, se molieron los fragmentos de nopal CocV en una licuadora de uso doméstico y se realizó el proceso de extrusión, al igual como se realizó con el nopal en BF.

Las variables evaluadas/tratamiento fueron: fibra cruda (FC), extracto etéreo (EE), proteína cruda (PC), extracto libre de nitrógeno (ELN), cenizas (Cen), flavonoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante por captura del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología- UMSNH.

Para todas las determinaciones del análisis químico proximal se utilizó una muestra de 2.0 g/tratamiento, a excepción de la determinación de PC en donde se usó una muestra de 0.7g/tratamiento. La fibra cruda se

determinó a través de una digestión con una solución ácida y posteriormente una alcalina, para finalmente calcinar el residuo (AOAC, 1998); en el caso de la determinación de PC, se determinó mediante el método Kjeldahl con factor de conversión de 6.25; para el EE se determinó mediante la metodología de la extracción con éter en un equipo Soxhlet; para Cen, su determinación fue mediante la incineración en mufla a 550 °C; el ELN se obtuvo por diferencia, restando a 100% los valores obtenidos de FC, PC, EE y Cen, lo anterior de acuerdo a los métodos del manual de la AOAC (1998).

Para el caso de la determinación de metabolitos secundarios (flavonoides totales, fenoles totales) y actividad antioxidante (DPPH), se preparó el extracto disolviendo 10.0 g de nopal en 100 mL de etanol 24 h después se filtró en total oscuridad para evitar la fotooxidación, para su posterior medición. Para la determinar los fenoles totales se utilizó la metodología de Singleton *et al.*, (1999) y Taga *et al.*, (1984) con algunas modificaciones. Se añadieron 100 µL del extracto acuoso a un tubo con 100 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (1 N) a esta mezcla se añadieron 2 mL de carbonato de sodio al 2% m/v, se agitó con un agitador magnético nuevamente y se conservó en la oscuridad durante 30 min. Posteriormente, determinó la absorbancia de las muestras a 750 nm usando un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, Perkin Elmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Se usaron soluciones de ácido gálico (Sigma-Aldrich®) entre 50 – 500 µg/mL para construir la curva de calibración. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto (mg EAG/g).

La cuantificación de flavonoides se realizó mediante la metodología de Dewanto *et al.*, (2002). Se añadieron 1400 µL del extracto, 600 µL MeOH y 600 µL de cloruro de aluminio, se dejó en reposo por 30 min y la cuantificación se realizó en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de quercetina por gramo de extracto (mg EQ/g). La curva de calibración fue construida usando quercetina (Sigma-Aldrich®) a 0–30 µg.

La determinación del porcentaje de inhibición de DPPH se basó en el método descrito por Brand-Williams (1995). Para ello, se diluyó el reactivo 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) con CH<sub>3</sub>OH a una concentración de  $6 \times 10^{-5}$  M. Para la cuantificación se incorporaron 100 µL de extracto y 1900 µL de solución de DPPH en un tubo de ensayo a temperatura ambiente y en oscuridad durante 15 minutos para su posterior medición a una absorbancia de 515 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, Perkin\_Elmer, Inc., Waltham, MA,

EE. UU.). Los resultados se expresaron en porcentaje de inhibición del radical DPPH.

La información recabada se analizó a través de ANOVA y las diferencias entre tratamientos se estimaron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha < 0.05$  (Littell *et al.*, 1998). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$$

Donde:

$y_{ij}$  = Variable respuesta: Fibra, Cenizas, Proteína, Extracto Etéreo, ELN, Flavonoides, Polifenoles, actividad antioxidante (DPPH).

$\mu$  = Promedio general

$T_i$  = Efecto fijo del Tratamiento con iésimo Tratamiento= T1, T2, T3, T4.

$e_{ij}$  = Error aleatorio asociado a cada observación ( $\sim$ NID = 0,  $\sigma^2 e$ ).

## Resultados

### Análisis fisicoquímico del nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento

Los resultados del análisis fisicoquímico del nopal determinaron efectos significativos del tratamiento sobre FC, PC, ELN y cenizas. No obstante, para el EE no hubo efecto de tratamiento ( $p > 0.05$ ). En este sentido, el porcentaje de FC fue mayor en T1 (nopal en BF) (28.8±2.1%) respecto a T2 (nopal CocV), T3 (nopal extruido en BF) y T4 (nopal extruido CocV); mientras que los valores menores de fibra se observaron en T4 (3.4±1.2%) (**Tabla 1**).

En relación al contenido de PC (%) (**Tabla 1**), se observó diferencias significativas entre tratamientos; el nopal extruido en BF mostró un mayor porcentaje (13.0±0.3%) respecto al resto de los tratamientos analizados. Sin embargo, los tratamientos T2 y T4 no observaron diferencias con relación a la PC (9.0%), pero, dicho porcentaje fue mayor al T1 (7.0±0.5%) (**Tabla 1**).

En cuanto a los resultados del EE (**Tabla 1**), los valores encontrados fueron similares estadísticamente en los cuatro tratamientos analizados: entre 3.1 y 4.4%. Mientras que para el ELN, el T3 (63.0±1.4%) y T4 (74.1±1.4%) mostraron los promedios mayores en esta variable, con respecto a T1 y T2; siendo los promedios de T3 y T4 diferentes entre sí (**Tabla 1**). En el caso de cenizas, el T1 fue el que mayor ( $p < 0.05$ ) porcentaje presentó (16.2±0.2%) en comparación con el resto de los tratamientos analizados. En cuanto a T2 y T3, estos

**Tabla 1.** Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis fisicoquímico del nopal de acuerdo con el tratamiento.

| Variable    | NOPAL             |                   |       | EXTRUSION DE NOPAL |                   |       |
|-------------|-------------------|-------------------|-------|--------------------|-------------------|-------|
|             | BF (T1)           | CocV (T2)         | ±E.E. | BF (T3)            | CocV (T4)         | ±E.E. |
|             | Media             | Media             |       | Media              | Media             |       |
| FC (%)      | 28.8 <sup>a</sup> | 13.2 <sup>b</sup> | 2.1   | 7.5 <sup>c</sup>   | 3.4 <sup>d</sup>  | 1.2   |
| PC (%)      | 7.0 <sup>a</sup>  | 9.2 <sup>b</sup>  | 0.5   | 13.0 <sup>c</sup>  | 9.0 <sup>b</sup>  | 0.3   |
| EE (%)      | 3.4               | 4.4               | 1.0   | 3.1                | 3.6               | 0.6   |
| ELN (%)     | 44.7 <sup>a</sup> | 59.8 <sup>b</sup> | 2.4   | 63.0 <sup>b</sup>  | 74.1 <sup>c</sup> | 1.4   |
| Cenizas (%) | 16.2 <sup>a</sup> | 13.5 <sup>b</sup> | 0.2   | 13.5 <sup>b</sup>  | 12.8 <sup>c</sup> | 0.1   |

EE=Error estándar; PC=Proteína cruda; EE=Extracto etéreo; ELN=Extracto libre de nitrógeno; BF=Base fresca; CocV=Cocido al vapor. Literales a,b,c,d indican diferencias significativas entre tratamientos (filas) (p<0.05).

mostraron valores de ceniza comparables (p>0.05) entre sí (13.5±0.2), pero mayores al T4 (12.8±0.1%).

**Metabolitos secundarios del nopal de acuerdo con el tratamiento**

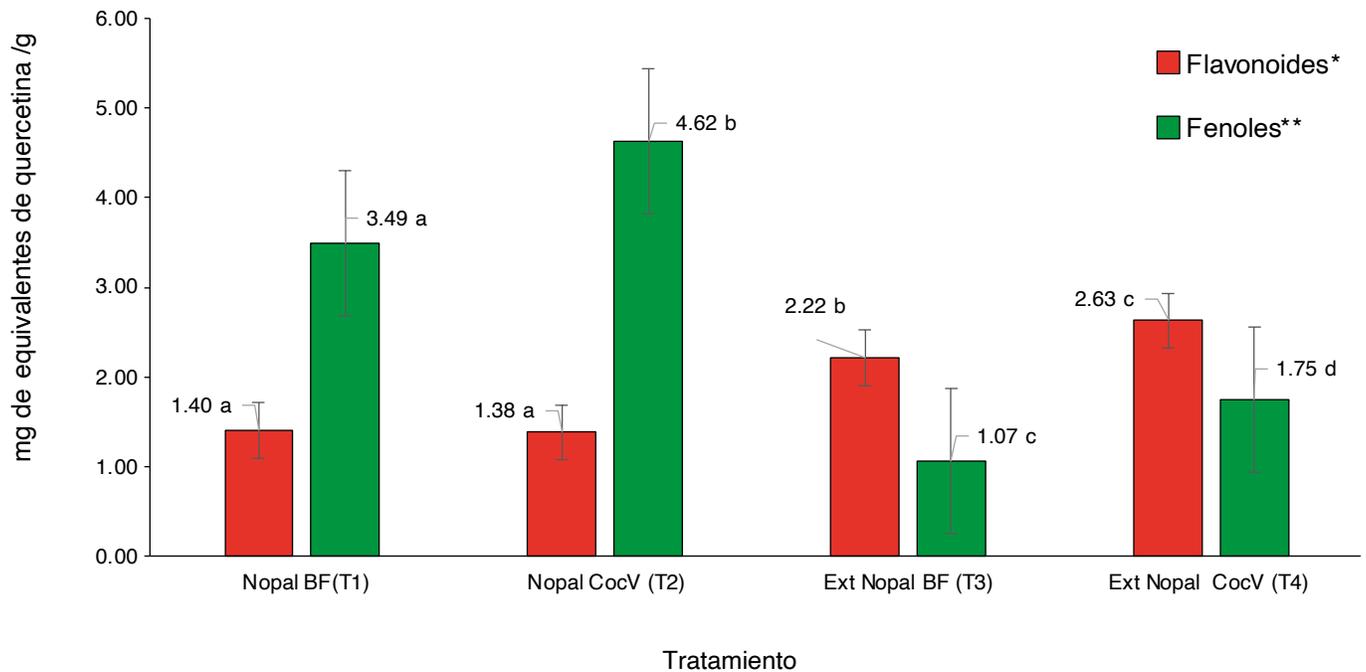
Con respecto a los resultados de metabolitos secundarios se encontró efecto de tratamiento sobre flavo-

noides totales (p<0.0001), fenoles totales (p<0.0001) y porcentaje de inhibición de DPPH (p<0.0001). El mayor contenido se encontró en T3 y T4 (2.22 y 2.63 mg EQ/g, respectivamente), ello en comparación con T1 y T2 (Figura 1), mismos que presentan contenidos similares entre sí (p>0.05). En el caso de los fenoles, los cuatro tratamientos analizados presentaron valores diferentes entre sí (p<0.05), siendo el de nopal CocV el que mostró la mayor concentración (4.62 mg EAG/g) de fenoles, seguido por el Nopal BF, observando el menor contenido los dos tratamientos de extrusión tanto el BF como en nopal CocV (Figura 1).

En cuanto al porcentaje de inhibición de DPPH, los valores del nopal extruido en BF (T3) y CocV (T4) fueron iguales entre sí (p>0.05) (21.6 y 23.2%) y mayores (p<0.05) a los obtenidos en el nopal en BF (T1) y CocV (T2): 12.2 y 5.8%, respectivamente (Figura 2).

**Discusión**

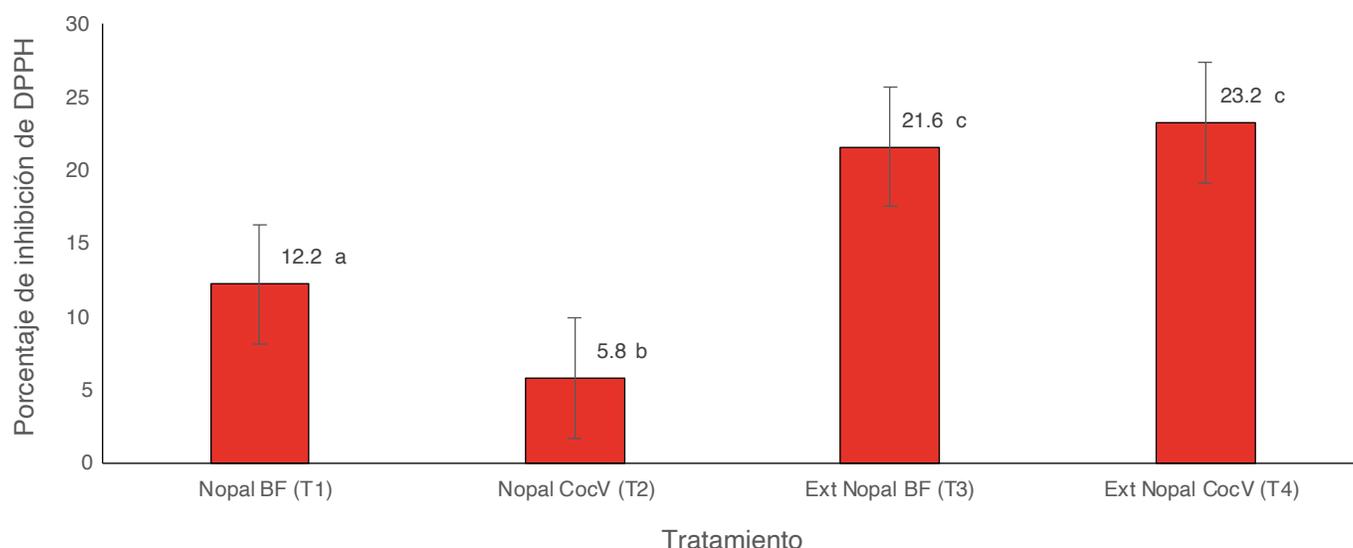
El proceso de extrusión del nopal modifica fisicoquímicamente las propiedades de esta cactácea. Al respecto, la FC observó una disminución con el tratamiento de CocV (T2), con el Nopal extruido BF y el Nopal extruido CocV. Es posible que los porcentajes de FC de los



**Figura 1.** Contenido de fenoles y flavonoides totales del nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento. Las barras representan la media ±EE del contenido de fenoles/flavonoides en EQ/g.

Ext= Extruido; BF= Base fresca; CocV= Cocido al vapor \*EQ/g; \*\*=EAG/g.

Literales a, b, c, d, indican diferencias (p<0.05) entre promedios de acuerdo a tratamiento y metabolito.



**Figura 2.** Porcentaje de inhibición de DPPH en el nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento. Las barras representan las medias  $\pm$  EE de los porcentajes calculados

Ext=Extruido; BF=Base fresca; CocV=Cocido al vapor

Literales a, b, c indican diferencias ( $p < 0.05$ ) entre promedios de acuerdo al tratamiento y metabolito

tratamientos analizados en esta investigación, específicamente los extruidos, presentaran bajos contenidos de FC debido a que altas temperaturas (cocción a vapor a 100 °C y/o deshidratación a 50 °C) promueven la ruptura de los componentes de la fibra, lo que puede ocasionar que se obtengan valores menores (González, 2002). Sin embargo, los valores de FC de T1 y T2 son menores a lo reportado por Ahumada (2021), quien también sometió a CocV a los cladodios y reportó 19.0% de FC y 31.5% de FC en nopal en BF (Testigo) aún y cuando en ambas investigaciones la edad de los cladodios utilizados fue similar ( $\geq 90$  días de edad) y provenían del mismo sitio de cultivo.

Asimismo, cabe la posibilidad que las diferencias de FC del nopal estén asociadas a la época del año en la que se realizó la recolección de los cladodios. Al respecto, Pérez-Sánchez *et al.* (2015) reporta valores de FC en cladodios de 90 días de 31.7 y 18.6% para la época de estiaje y de lluvias, respectivamente. Por lo que, no solo el proceso de extrusión y la CocV afectaría los valores de FC del nopal, sino que también, la época del año en la que se recolectan y procesan los cladodios de nopal.

Otro componente químico del nopal que mostró diferencias entre el proceso de extrusión y la CocV fue la PC. Al respecto, Ortiz *et al.*, (2022), reporta mayor porcentaje de PC (17.6%) en el nopal CocV *versus* nopal BF (14.3%); fenómeno similar a los observado en esta investigación; sin embargo, los contenidos de PC fueron menores a los reportados por estos autores.

En cuanto al proceso de extrusión del nopal, la PC fue mayor en el nopal extruido en BF (T3) en comparación con el nopal extruido CocV (T4). Pérez-Sánchez *et al.*, (2015), reporta porcentajes de PC en el nopal en BF mayores ( $p < 0.05$ ) en cladodios jóvenes en comparación con los adultos (4.4 y 8.3%, respectivamente) y, de acuerdo con la época del año, existe un cambio de PC, siendo mayor ( $p < 0.05$ ) en época de lluvias (4.4 y 5.9% para época de estiaje y época de lluvia respectivamente). Kulmyrzaev *et al.*, (2000) reportan que carbohidratos como la sacarosa, la lactosa, la glucosa y el glicerol estabilizan las proteínas contra la desnaturalización térmica. Damodaran (2017) también mencionó que el procesamiento a presión, a diferencia del procesamiento térmico, no daña los aminoácidos esenciales, el color ni el sabor natural; por lo tanto, procesar alimentos con alta presión hidrostática puede resultar ventajoso para ciertos alimentos. Ramírez-Moreno *et al.*, (2013) estableció que, cuando se someten los cladodios a agua a temperatura  $\geq 90$  °C durante 20 min se incrementa la PC, puesto que la temperatura de cocción puede contribuir a romper algunas de las atracción e hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno o enlaces electrostáticos y provocar que las proteínas se unan con otros compuestos químicos como carbohidratos, lípidos, compuestos de fibra, entre otros. Así, cuando se aplica calor, se rompen los enlaces entre la proteína y otros compuestos químicos, lo que provoca que la proteína se libere y, por ello, se cuantifica mayor cantidad de proteína.

Generalmente, las proteínas presentes en los alimentos se desnaturalizan en un rango de temperatura de 40 a 80 °C, a presión atmosférica; sin embargo, el contenido de agua facilita enormemente la desnaturalización térmica de estas (Damodaran, 2017). Lo anterior podría explicar el mayor porcentaje de PC en el nopal extruido BF, puesto que en este proceso la temperatura máxima utilizada fue de 50 °C, mientras que en la extrusión de nopal CocV fue primeramente cocción a vapor a 100 °C y posteriormente deshidratación a 50 °C. No obstante, existen pocas investigaciones sobre el efecto de la cocción sobre el contenido nutricional del nopal, sin embargo, la cocción (microondas o freír) de hongos *Amanita zambiana* provoca aumento de PC, posiblemente esto pudiera estar relacionado con la hidrólisis enzimática de proteínas insolubles (Reid *et al.*, 2016).

En cuanto a los valores de cenizas (Cen), Ortiz *et al.* (2022) reportan valores de 27.8 y 20.9% en nopal en BF y nopal CocV, valores superiores a los encontrados en esta investigación; sin embargo, coinciden en un mayor porcentaje en el nopal en BF vs CocV. Moreno *et al.*, (2015), también reportó dicho efecto al someter a la papa de la variedad Puca Shungo a procesos térmicos. Dicha disminución puede atribuirse a la filtración de los minerales solubles hacia el agua de cocción durante un proceso térmico acuoso (Ahmed *et al.*, 2013).

En lo referente a los metabolitos secundarios, en la presente investigación se pudo observar que los valores de flavonoides son similares por los reportados por Guevara-Figueroa *et al.*, (2010), Pérez (2021) y Manzanarez-Tenorio *et al.* (2022) en el nopal en BF, quienes indican valores de 2.0, 1.7 y 3.1 mg EQ/g, respectivamente. No obstante, la posible disminución se debe al proceso de deshidratación con aire caliente, mismo que provoca su degradación (Márquez *et al.*, 2003). Sin embargo, el aumento de los flavonoides en el extruido de nopal (T3 y T4) puede deberse a que la compresión mecánica durante la extrusión puede romper las paredes celulares de las plantas y liberar los compuestos encapsulados (Navarro-Valdez *et al.*, 2020), lo que podría permitir que los flavonoides que estaban atrapados en las células sean liberados y se vuelvan más disponibles para su medición.

Para el caso de los fenoles totales, los valores obtenidos concuerdan con lo reportado por Ramírez-Moreno *et al.* (2013), quienes encontraron valores similares a los de la presente investigación. Estos investigadores observaron valores en MS de 3.7 y 5.7 mg EAG/g para nopales de 30 días de edad liofilizado y cocido, respectivamente. Además, de acuerdo con Manzanarez-Tenorio *et al.*

(2022), reportó valores de fenoles en nopal morado y verde de 2.3 y 2.1 mg EAG/g, respectivamente. Lo que pudiera sugerir que las concentraciones de este metabolito secundario están determinadas no solo por el tratamiento térmico, sino también, por la edad y la variedad del nopal que se trate. Por ejemplo, la deshidratación del nopal mediante la aplicación de calor provocar que el contenido de fenoles disminuya considerablemente (Martínez-Soto *et al.*, 2015).

Finalmente, respecto a los resultados del porcentaje de inhibición de DPPH, se observó que dichos porcentajes fueron mayores en los extruidos de nopal en BF y CocV vs nopal BF y nopal CocV; pero, menores a los reportados por Figueroa-Pérez *et al.* (2018): 46.1 y 48.1%, para nopal verdura viejo (30 días) y joven (12 días de edad), respectivamente, mientras que Pérez (2021), reporta valores de inhibición de 40.5 y 45.7% en nopal forrajero de 90 días de edad, deshidratado a 50 °C y liofilizado, respectivamente.

La disminución o posibles variaciones de la actividad antioxidante en el nopal puede deberse a diversos factores tales como: la deshidratación mediante aire caliente (Karam *et al.*, 2016), variedad y madurez de los cladodios, temperatura, textura y grosor de los cladodios; además, presencia de oxígeno e incluso, la técnica de extracción de los antioxidantes (Kamiloglu *et al.*, 2016).

En general, el efecto del proceso de extrusión de los alimentos sobre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante, pueden estar sujetos a múltiples factores, incluidos la naturaleza de los metabolitos, las condiciones específicas de extrusión y los componentes totales de los alimentos. En este sentido, los resultados obtenidos en esta investigación determinaron que el proceso de extrusión provocó una mayor medición de metabolitos secundarios y su efecto antioxidante.

## Conclusión

El proceso de extrusión del nopal en BF mejora los contenidos de PC, FC y Cen, y disminuye el ELN, ello en comparación con el nopal extruido CocV. Sin embargo, el nopal extruido CocV, presenta mayores valores de metabolitos secundarios y acción antioxidante. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, se puede sugerir que la opción que representa mayor viabilidad para ser utilizado en la formulación de dietas es el nopal extruido BF, en donde el proceso de extrusión puede representar una alternativa para el uso del nopal y la conservación de este sin que pierda de manera importante sus propiedades antioxidantes.

## Referencias

- Achón TM, González GP, Varela MG (2018). Criterios de armonía funcional entre gastronomía y salud: una visión desde la comunidad científica. *Nutrición Hospitalaria* 35:75-84. doi:10.20960/nh.2131.
- Ahmed FA, Ali RFM (2013). Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh and processed white cauliflower. *BioMed Research International* 2013:1-9. doi:10.1155/2013/367819.
- Ahumada GJT (2021). Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) cocido a la dieta de cerdas post-parto sobre: perfil metabólico y consumo voluntario de alimento. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p. 32.
- AOAC (1998). Official Method of Analysis. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Argentel-Martínez L, Peñuelas-Rubio O, Perales-Segovia C, González-Gaona E, García-Munguía AM, Leyva-Ponce JA (2024). Introducción al Cultivo del Nopal. En: González-Gaona E, Argentel-Martínez A, Perales-Aguilar L, Peñuelas-Rubio O, García-Munguía AM, De Lira-Ramos KV (Compiladores). El Nopal: Ecofisiología del Nopal en México. Editorial Pantanal. Mato Grosso – Brasil. doi:10.46420/9786585756211
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology* 28:25–30. doi:10.1016/S0023-6438(95)80008-5.
- Damodaran S, Parkin KL (2017). Fennema's Food Chemistry. *CRC Press*. 5:122. doi:10.1201/9781315372914.
- Dewanto V, Wu X., Adom KK, Liu RH (2002). Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:3010–3014. doi:10.1021/jf0115589.
- DOF NMX (2018). Norma oficial Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018. Alimentos para animales, determinación de humedad en alimentos balanceados e ingredientes mayores. Diario oficial de la federación. SEGOB. [En línea] [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5541957&fecha=24/10/2018#gsc.tab](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541957&fecha=24/10/2018#gsc.tab)
- Elizondo AE (2010). Evaluación del efecto de dietas formuladas con o sin harinas de origen animal en el rendimiento de pollos de engorde. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. P. 17-18.
- Elshehy HR, El-Sayed SS, Abdel.Mawla EM, Agamy NF (2020). Nutritional Value of Cladodes and Fruits of Prickly Pears (*Opuntia ficus-indica*). *Alexandria Journal of Food Science and Technology* 17(1):17-25. doi:10.21608/ajfs.2020.105626
- FAO (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. pp 2-5.
- Figueroa-Pérez MG, Pérez-Ramírez IF, Paredes-López O, Mondragón-Jacobo C, Reynoso-Camacho R (2018). Phytochemical composition and in vitro analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity. *International Journal of Food Properties* 21:1728-1742. doi:10.1080/10942912.2016.1206126.
- González OYJ (2002). Contenido de fibra cruda y fibra dietética en mezclas de cereal- leguminosa sometidas a germinación y tratamiento térmico. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro, México. P.50-52.
- Guevara-Figueroa T, Jiménez-Islas HL, Reyes-Escogido ML, Mortensen AG, Laursen BB, Li-Wei W, León-Rodríguez A, Fomsgaard IN, De la Rosa AP (2010). Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *Journal of Food Composition and Analysis* 23:525-532. doi:10.1016/j.jfca.2009.12.003.
- Gutiérrez RAM, Arriola GE, Jacques FGE, Morales HN, Corona GRI, Guatemala MGM (2017). Caracterización fisicoquímica de un alimento extrusión tipo botana". *Encuentro Nacional de la AMIDIQ* 1-5. doi:10.36331/revista.v2i2.15
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010, Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. P. 45-50.
- Kamiloglu S, Toydemir G, Boyacioglu D, Beekwilder J, Hall RD, Capanoglu E (2016). A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56(1):110-S129. doi:10.1080/10408398.2015.1045969
- Karam MC, Petit J, Zimmer D, Djantou EB, Scher J (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering* 188:32-49. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001.
- Kulmyrzaev A, Chanamai R, McClements D (2000). Influence of pH and CaCl<sub>2</sub> on the stability of dilute whey protein stabilized emulsions. *Food Research International* 33:15–20. doi:10.1016/S0963-9969(00)00018-1.
- Littell RC, Henry PR, Ammerman CB (1998). Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures. *Journal of Animal Science* 76(4):1216-1231. doi:10.2527/1998.7641216x.
- Loor-Mendoza NE (2016). Fundamentos de los alimentos peletizados en la nutrición animal. *Dominio de las Ciencias* 592:323-333. doi:10.23857/dc.v2i4.257
- Manzanarez-Tenorio LE, Ruiz-Cruz S, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Márquez-Ríos E, Toro-Sánchez CL, Suárez-Jiménez GM (2022). Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y contenido de fenoles y flavonoides totales de nopal morado (*Opuntia gosseliniana*) en dos etapas de coloración. *Biotecnia* 24(3):101-106. doi:10.18633/biotecnia.v24i3.1662
- Márquez CCJ, Ciro VHJ, Rojano BA (2003). Efecto de un proceso de deshidratación con aire forzado en la composición química y nutricional de la mora de castilla (*Rubus glaucus*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 56(1):1865-1876
- Martínez-Soto G, Celis-Fabián F, Hernández-Pérez T, Paredes-López O (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia* spp.). *International Journal of Food and Nutritional Science* 2(2):168-173. doi:10.15436/2377-0619.15.023
- Moreno C, Andrade MJ, Oña G, Llumiangua T, Concellón A (2015). Efecto de la cocción sobre la composición química y capacidad antioxidante de papas nativas del Ecuador. *Revista Científica*

*Ecuatoriana* 35:20–26.

Navarro-Valdez K, Capillo-Herrera N, Calixto-Cotos MR, Santisteban-Rojas OP (2020). Extracción y microencapsulación de compuestos antioxidantes de la semilla de *Oenocarpus bataua* Mart. *Scientia Agropecuaria* 639:547-554. doi:10.17268/sci.agropecu.2020.04.10

Ortiz RR, Ahumada GJT, Pérez SRE, García-Saucedo PA, Martínez-Flores HE, Val AD (2022). Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 24:239-250. doi:10.56890/jpacd.v24i.436

Osorio-Córdoba J, Pelayo-Zaldívar C, Verde-Calvo JR, Ponce-Valadez M, Díaz de León-Sánchez F, Bosquez-Molina E, Rodríguez Huezo Ma.E (2011). Conservación de nopal verdura 'Milpa Alta' (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista mexicana de ingeniería química* 10(1):93-104

Pérez SI (2021). Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p. 116.

Pérez-Sánchez RE, Delgado-Sánchez Lauro A, García-Saucedo PA, Pulido J, Ortiz-Rodríguez R (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova Scientia* 7(15):133-152.

Ramírez-Moreno E, Córdoba-Díaz D, Sánchez-Mata M, Díez-

Marquez C, Goñi I (2013). Effect of boiling on nutritional, antioxidant and physicochemical characteristics in cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *LWT-Food Science and Technology* 560:296-302. doi:10.1016/j.lwt.2012.10.005

Reid T, Munyanyi M, Mduluzi T (2016). Effect of cooking and preservation on nutritional and phytochemical composition of the mushroom *Amanita zambiana*. *Food Science & Nutrition* 833:538-544. doi:10.1002/fsn3.428

SADER (2020). El nopal es un producto endémico de México en donde, además, se ha diversificado: de las 200 especies de nopales, 101 viven en nuestro país. [https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-](https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo)

SIAP (2023). ¡Y el nopal ingreso en la dieta simbólica y real de los mexicanos! Cifras y datos sobre esta ancestral planta. <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos> [consultado el 13 de agosto de 2023].

Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventos RM (1999). Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods Enzymology* 299:152–178.

Taga MS, Miller EE, Pratt DE (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *Journal of American Oil Chemists Society* 61:928-931.

Trindade S, Rouxinol MI, Agulheiro-Santos AC (2023). *Opuntia ficus-indica* L. fruits cold storage using different packaging materials. *Sustainability* 15(14). doi:10.3390/su151411334



# Producción de inulinasas por *Kluyveromyces marxianus*

Production of inulinases by *Kluyveromyces marxianus*

Alejandra Guadalupe Méndez González, Yadira Belmonte Izquierdo, Juan Carlos González Hernández\* 

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Avenida Tecnológico 1500, Morelia, Mich., 58120, México.

## Historial

Manuscrito recibido: 4 de agosto de 2024  
Manuscrito aceptado: 13 de mayo de 2025  
Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Juan Carlos González Hernández  
[juan.gh@morelia.tecnm.mx](mailto:juan.gh@morelia.tecnm.mx)  
ORCID: 0000-0003-2558-5108

## Resumen

Los microorganismos son una fuente potencial de enzimas capaces de degradar polisacáridos complejos de más de 10 unidades en azúcares sencillos como la fructosa y la glucosa, además tienen la capacidad de producir oligosacáridos o polímeros a partir de monómeros. Particularmente, algunos microorganismos producen fructooligosacáridos (FOS), oligosacáridos de fructosa que van de las 3 a las 12 unidades, los cuales son el alimento de las bifidobacterias y los lactobacilos, bacterias benéficas que habitan en el colon. Los FOS se utilizan en la industria farmacéutica y alimentaria como aditivos en alimentos funcionales. Existen levaduras que poseen actividad enzimática inulinasa (hidrolizan polímeros y producen FOS) o bien actividad fructosiltransferasa (producen FOS a partir de la sacarosa). *K. marxianus* es una levadura con potencial para producir FOS mediante la selección de cepas, la preparación de un medio de cultivo adecuado, las condiciones óptimas de fermentación y la recolección de enzimas. Al seguir esta práctica es posible la obtención de dichas enzimas de manera efectiva y sostenible, contribuyendo a la creación de productos más saludables y a la optimización de procesos industriales.

**Palabras clave:** Enzimas, fructosiltransferasas, hidrólisis, inulinasas, *K. marxianus*.

## Aplicaciones biotecnológicas de las levaduras

Las levaduras son organismos unicelulares esenciales en la fabricación de alimentos y bebidas, tienen diversas aplicaciones biotecnológicas, su velocidad de reproducción suele ser mayor a otros microorganismos y son capaces de adaptarse con facilidad a cambios de temperatura y crecer utilizando diversos sustratos. Particu-

## Abstract

Microorganisms are a potential source of enzymes capable of degrading complex sugars of more than 10 monomer units into simple sugars such as fructose and glucose, and they also have the capacity to produce oligosaccharides or polymers from monomers. In particular, some microorganisms produce fructooligosaccharides (FOS), which are fructose oligosaccharides ranging from 3 to 12 units. These are the foods of bifidobacteria and lactobacilli, which are beneficial bacteria that inhabit the colon. FOS are used in the pharmaceutical and food industries as additives in functional foods. There are yeasts that have inulinase enzymatic activity (hydrolyze polymers and produce FOS) or fructosyltransferase activity (produce FOS from sucrose). *K. marxianus* is a yeast with the potential to produce FOS through strain selection, preparation of an appropriate culture medium, optimal fermentation conditions and enzyme harvesting. By following this practice, it is possible to obtain these enzymes in an effective and sustainable manner, contributing to the creation of healthier products and the optimization of industrial processes.

**Keywords:** Enzymes, fructosyltransferases, hydrolysis, inulinases, *K. marxianus*.

larmente, *K. marxianus*, es una levadura que se obtiene de frutas o bebidas fermentadas, la cual destaca por su capacidad para producir inulinasas,  $\beta$ -galactosidasas y  $\beta$ -glucosidasas. A diferencia de *Saccharomyces*, *K. marxianus* no solo fermenta y oxida azúcares, sino que también hidroliza enlaces de manera eficiente (Mendoza-Gardeazábal, 2013; Fonseca *et al.*, 2008). Aunque los estudios sobre *K. marxianus* suelen centrarse en sus aplicaciones potenciales, tales como el procesamiento

del suero de leche, la fermentación de azúcares y la producción de alcohol, aún se desconocen muchos aspectos sobre su bioquímica y metabolismo (Mendoza-Gardeazábal, 2013). Las principales aplicaciones industriales de esta levadura se ilustran en la **Figura 1**.

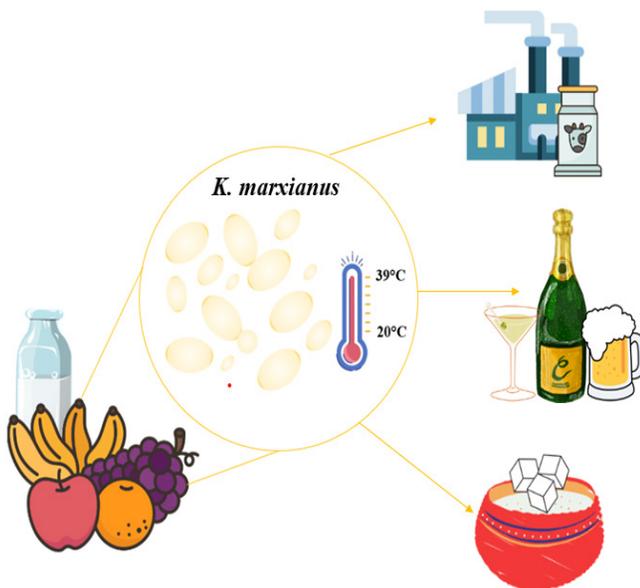
*K. marxianus* se cultiva en sustratos y condiciones específicas, dependiendo del bioproducto que se desee obtener. Una aplicación potencial es la producción de FOS, en levaduras se ha reportado el uso de dos sustratos principales, la sacarosa (disacárido de glucosa y fructosa) y la inulina. La inulina es un azúcar no digerible por los humanos, que se encuentra en las raíces y los tubérculos como la alcachofa de Jerusalén y la achicoria, la cual es una fuente valiosa de edulcorantes bajos en calorías debido a su alto contenido de fructosa (Kalil *et al.*, 2001). La inulina es un polímero de fructosas con una unidad de glucosa terminal, debido a su estructura al incorporarse en un producto alimenticio, este se considera un alimento funcional. Además, la inulina tiene aplicaciones en la industria alimentaria por sus propiedades organolépticas y su capacidad para mejorar la conservación de los alimentos (Olvera *et al.*, 2007; Madrigal y Sangronis, 2007).

La producción de FOS mediante levaduras se realiza por inulinasas, enzimas con actividad fructosiltransferasa (FTasas), particularmente las  $\beta$ -fructofuranosidasas (FFasas) (Belmonte-Izquierdo *et al.*, 2023). Los FOS

no se absorben por el sistema digestivo humano, por lo cual actúan como prebióticos en el colon, alimentando a bifidobacterias y lactobacilos. Este efecto promueve la salud intestinal al estimular el sistema inmunológico, contribuyendo en la prevención de infecciones y en la absorción de minerales, además de reducir el riesgo de cáncer colon-rectal (Olvera *et al.*, 2007). Los beneficios del consumo de FOS y su impacto en la salud digestiva se muestran en la **Figura 2**.

*K. marxianus* es una levadura conocida por su alta capacidad para producir inulinasas, sin embargo, su capacidad para producir FFasas aún no ha sido explorada. La **Figura 3** ilustra la producción de FOS mediante las inulinasas producidas por *K. marxianus*. Primeramente, las inulinasas escinden la inulina como sustrato formando FOS, podría darse el caso de producción de FFasas al utilizar un medio rico en sacarosa (Rodríguez-Vázquez, 2018).

Las inulinasas contribuyen en la producción de diversos compuestos como etanol, acetona, butanol y sorbitol, los cuales tienen una gran aplicación en la industria alimenticia (Singh y Singh, 2010). Por su parte, las enzimas con actividad FTasa son utilizadas para producir alimentos como prebióticos, edulcorantes y alimentos bajos en calorías (Rodríguez-Vázquez, 2018). En la **Figura 4** se muestran los productos que se producen a partir de estas enzimas.



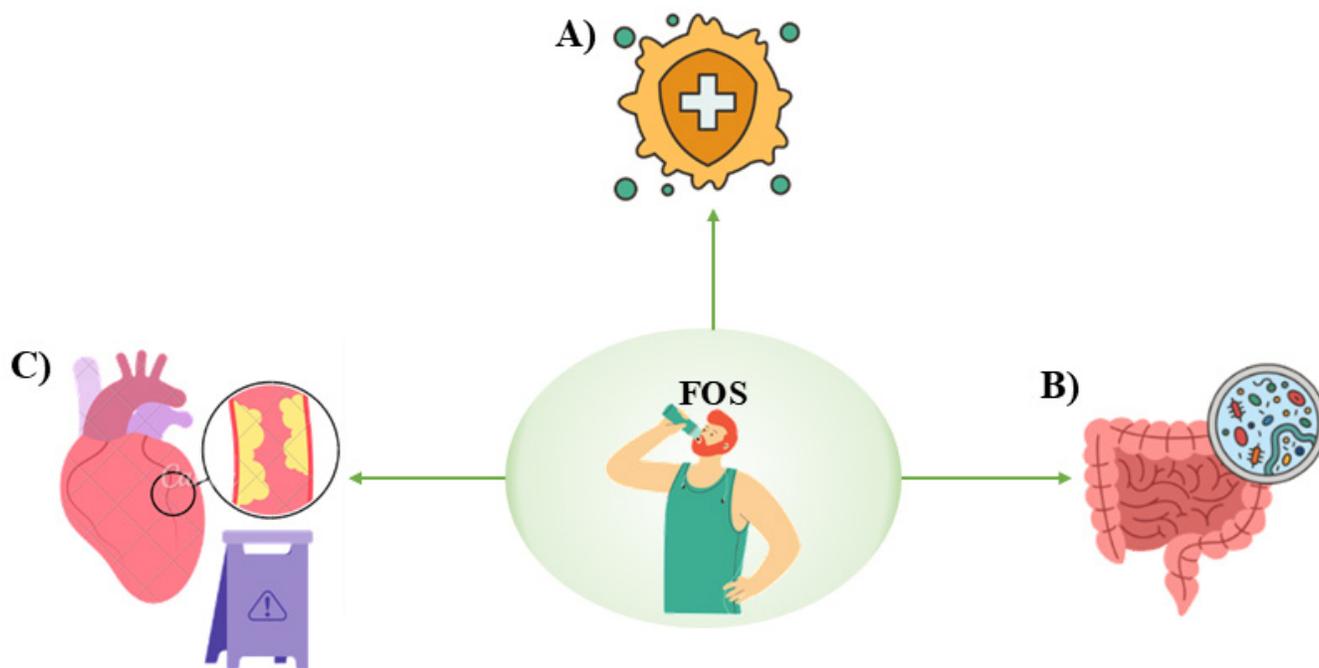
**Figura 1.** *K. marxianus* y sus aplicaciones biotecnológicas. La imagen ilustra la versatilidad de esta levadura en la fermentación de diversos sustratos. Se destaca su capacidad de crecer a altas temperaturas y su uso en la industria láctea, la producción de bebidas alcohólicas, la obtención de azúcares y bioproductos. Además, se muestran algunas fuentes naturales de obtención de esta levadura, tales como las frutas y la leche.

## *K. marxianus*

*K. marxianus* es una levadura filogenéticamente relacionada con *Saccharomyces cerevisiae*, la cual posee un alto potencial para producir inulinasas (Castillo-Calderón y Chamy-Maggi, 2010). Las aplicaciones biotecnológicas de *K. marxianus* destacan debido a su capacidad de crecer en diversos sustratos y a altas temperaturas (superiores a 52 °C), mayores tasas de crecimiento específicas y una menor tendencia a producir etanol cuando se expone a exceso de azúcares (Fonseca *et al.*, 2008). *K. marxianus* es capaz de sintetizar una gran variedad de azúcares como la lactosa, la inulina y la sacarosa, convirtiéndose en la levadura líder para la mejora de productos y procesos actuales (Rodríguez-Vázquez, 2018; Castillo-Calderón y Chamy-Maggi, 2010).

## Enzimas inulinasas

Las inulinasas hidrolizan la inulina en unidades monoméricas. La longitud de la cadena de inulina varía según factores específicos de la planta de origen, como su procedencia, condiciones de crecimiento, edad y méto-



**Figura 2.** Beneficios del consumo de FOS. La imagen ilustra los efectos positivos de los fructooligosacáridos (FOS) en la salud. **A)** Estimulan el sistema inmunitario (representado por un escudo protector). **B)** Modifican la microbiota intestinal, favoreciendo el crecimiento de bacterias benéficas. **C)** Contribuyen a la prevención de enfermedades cardiovasculares al reducir el riesgo de obstrucciones arteriales.



**Figura 3.** Representación simplificada de la producción de fructooligosacáridos (FOS) mediante: A) Inulinasas de *K. marxianus* que actúan sobre la inulina, produciendo FOS. B) Área de oportunidad para evaluar las FFasas de *K. marxianus* en un medio rico en sacarosa en la producción de FOS.

do de almacenamiento. Estas enzimas se han producido mediante fermentaciones utilizando diversos sustratos y microorganismos. La acción hidrolítica de las inulinasas sobre la inulina produce fructosa y FOS como productos principales (Singh y Singh, 2017). Además, es importante resaltar que existen dos tipos de inulinasas, las endoinulinasas y las exoinulinasas. La **Figura 5** ilustra la estructura tridimensional de la endoinulinasas INU1 de *K. marxianus* DMKU3-1042.

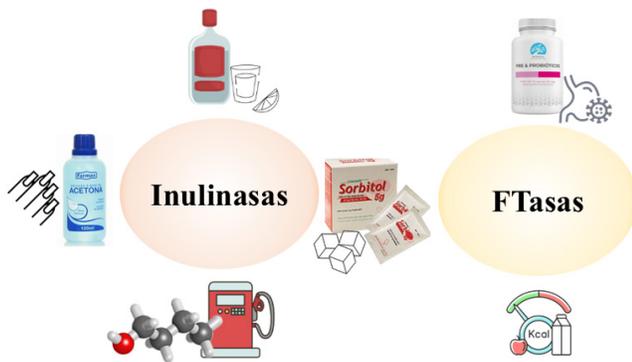
### Producción de inulinasas mediante *K. marxianus*

*K. marxianus* produce una gran concentración de inulinasas. La inulina es degradada por dos tipos de inulinasas: las endoinulinasas y las exoinulinasas. Las exoinulinasas liberan la unidad terminal de fructosa de la molécula de inulina, mientras que las endoinulinasas actúan de manera aleatoria en el interior de la molécula, rompiendo los enlaces glucosídicos y produciendo FOS (Singh y Singh, 2017; **Figura 6**).

La producción de enzimas se ve influenciada por factores como pH del medio, aireación y temperatura de la fermentación. Las enzimas inulinasas provenientes de levaduras de acuerdo con algunos estudios tienen una temperatura óptima de crecimiento de 45 °C, y un crecimiento estable a 50 °C, pH entre 4.4 y 6.5 para exoinulinasas y endoinulinasas, respectivamente (Singh y Singh, 2010). Algunos sustratos y condiciones utilizadas para

la producción de enzimas inulinasas se presentan en la **Tabla 1**.

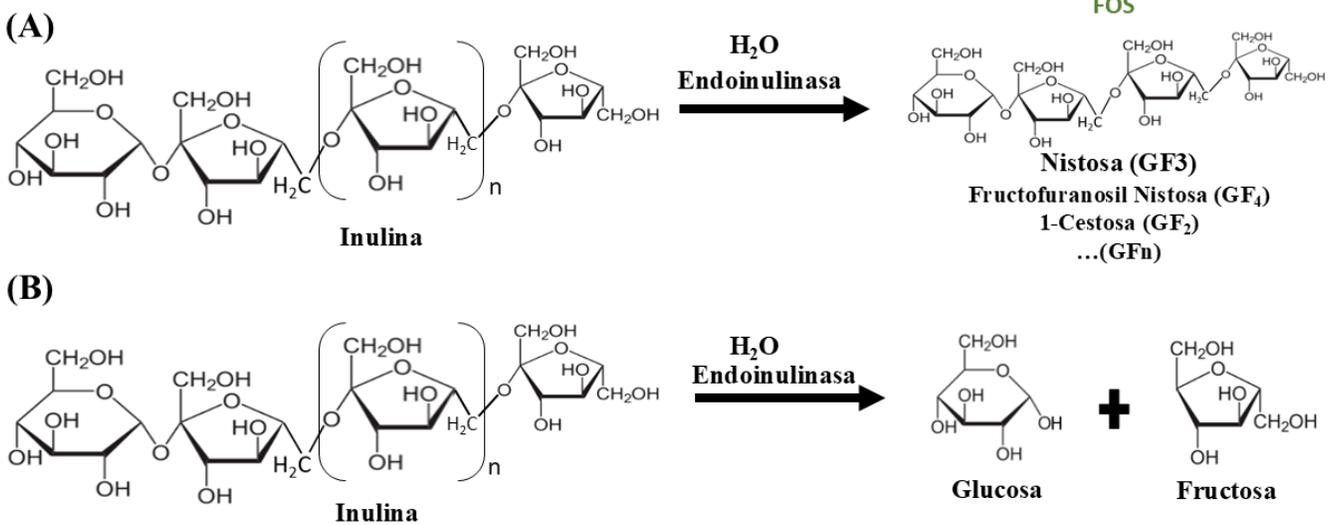
En la producción de inulinasas el aumento en la can-



**Figura 4.** Productos obtenidos por enzimas inulinasas y sus aplicaciones en la industria. La imagen muestra cómo las inulinasas permiten la producción de sorbitol, bioetanol, acetona y alcohol etílico, con aplicaciones en los sectores alimentario, químico y energético. Por otro lado, las FTasas se asocian con la generación de prebióticos y compuestos bajos en calorías, usados en alimentos funcionales. En comparación con las diversas cepas de hongos y bacterias, las levaduras cuentan con una gran eficiencia para producir enzimas.



**Figura 5.** Estructura tridimensional de la endoinulinasa INU1 de *K. marxianus* DMKU3-1042 (código PDB 6J0T). Su estructura ha sido determinada mediante cristalografía de rayos X. El sitio activo de la enzima se localiza en una cavidad accesible, rodeada por residuos de aminoácidos clave que facilitan la catálisis. Entre estos, destacan residuos de ácido glutámico y ácido aspártico. Esta configuración estructural permite a INU1 reconocer y degradar eficientemente la inulina en moléculas de menor tamaño (PDB, 2019).



**Figura 6.** Mecanismo de acción de las inulinasas al utilizar inulina como sustrato. **(A)** La endoinulinasa reconoce la estructura de la inulina y se une al sustrato a través del sitio activo, se produce una hidrólisis, rompiendo la cadena y liberando FOS, este proceso continúa hasta que la inulina se fragmenta en múltiples unidades de FOS. **(B)** Por su parte, la exoinulinasa hidroliza la inulina desde sus extremos no reductores, liberando moléculas de fructosa secuencialmente, el proceso se repite hasta que toda la inulina se ha convertido en fructosa, lo que es ideal para la producción de jarabes ricos en fructosa.

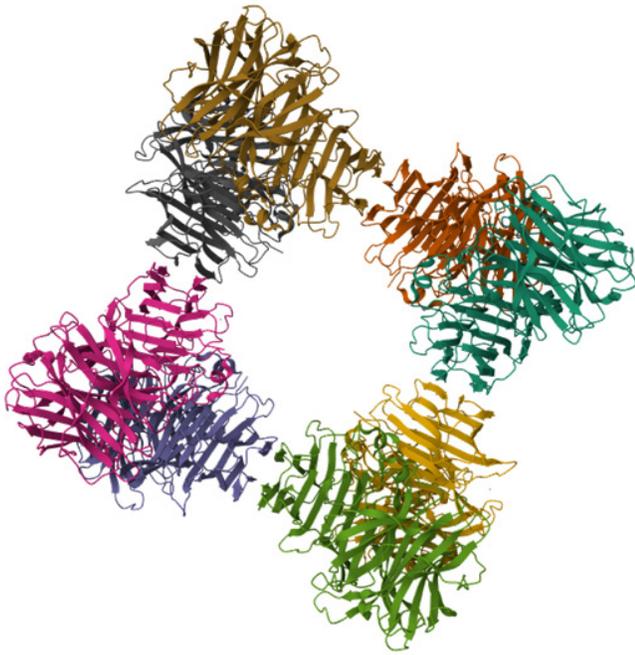
**Tabla 1.** Condiciones fermentativas para la producción de inulinasas por *K. marxianus* y para la síntesis de FOS (Tomado y modificado de: Castillo y Chamy, 2010; Hernández-Colomé, 2019; León-Lira, 2021).

| Levadura                                   | Enzima                      |                      |        | Condiciones de cultivo |   | Producto |   |  | Referencias |                        |
|--|-----------------------------|----------------------|--------|------------------------|---|----------|---|--|-------------|------------------------|
|  | Nombre                      | Actividad enzimática | Unidad | Cultivo                | Componentes   | g/L      | Condiciones   | FOS  |             | g/L                    |
| <i>K. marxianus</i> var. <i>bulgaricus</i> | Inulinasas                  | 170                  | U/mg   | Líquido                | Inulina   | 20 ml/L  | Agitación = 200 rpm<br>T = 30°C<br>t = 72 h                                     | n.d  | n.d         | Castillo y Chamy, 2010 |
|  | Inulinasas                  | 4.1                  | U/mL   | Líquido                | Extracto de yacón   | 30       | pH = 3.5<br>T = 20-40°C<br>t = 16 h   | n.d  | n.d         |                        |
| <i>K. marxianus</i> YS-1                   | Inulinasas                  | 50.2                 | U/mL   | Líquido                | Extracto pulverizado de raíz de espárrago (4% de inulina)                   | 1.54     | Agitación = 1200 rpm<br>pH = 6.5<br>T = 30°C<br>t = 60 h<br>aireación: 0.75 vvm | n.d  | n.d         | Hernández-Colomé, 2019 |
| <i>K. marxianus</i>                        | Inulinasas                  | 23                   | U/mL   | Líquido                | Fructanos de agave tequilana  | 20       | Agitación = 240 rpm<br>pH = 5.5<br>T = 30°C<br>t = 45 h<br>aireación: 0.3 vvm   | n.d  | n.d         |                        |
|  |                             |                      |        |                        | Nitrato de amonio (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )                        | 3.6      |   |  |             |                        |
|  |                             |                      |        |                        | Fosfato dibásico de amonio (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> | 0.073    |   |  |             |                        |
|  |                             |                      |        |                        | Fosfato dipotásico (K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )                       | 7.4      |   |  |             |                        |
|  |                             |                      |        |                        | Extracto de levadura  | 15       |   |  |             |                        |
| <i>K. marxianus</i> AZ8                    | Inulinasas (exo-inulinasas) | n.d                  | n.d    | Líquido                | Sacarosa  | 10       | Agitación = 500 rpm<br>pH = 5<br>T = 50°C<br>t = 24 h                           | Kestosa<br>Difructosa<br>Nistosa<br>Trifructosa,<br>Fructosilnistora<br>Tetrafructosa<br>Pentafructosa | n.e         | León-Lira, 2021        |
|  | Inulinasas                  | 3983                 | U/mg   | Líquido                | Sacarosa  | 45       | Agitación = 500 rpm<br>pH = 6<br>T = 60°C<br>t = 30 min                         | Kestosa<br>Difructosa<br>Nistosa<br>Trifructosa,<br>Fructosilnistora                                   | n.e         |                        |

n.e: no especificado; n.d: no determinado

tividad de sustrato y el pH reduce la actividad enzimática, mientras que un incremento en el extracto de levadura, peptona y fosfato dipotásico (K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) la promueve (Cazetta *et al.*, 2005). Para las levaduras, el pH óptimo oscila entre 4.4 y 6.5, aunque algunos estudios con extractos de yacón indican actividad enzimática desde pH entre 3.5 y 4.0, estable hasta pH de 6.5 y nula a pH de 10.5 (Kalil *et al.*, 2001; Castillo-Calderón y Chamy-Maggi, 2010). *K. marxianus* es especialmente valorado por su alta producción de inulinasas, crucial para la conver-

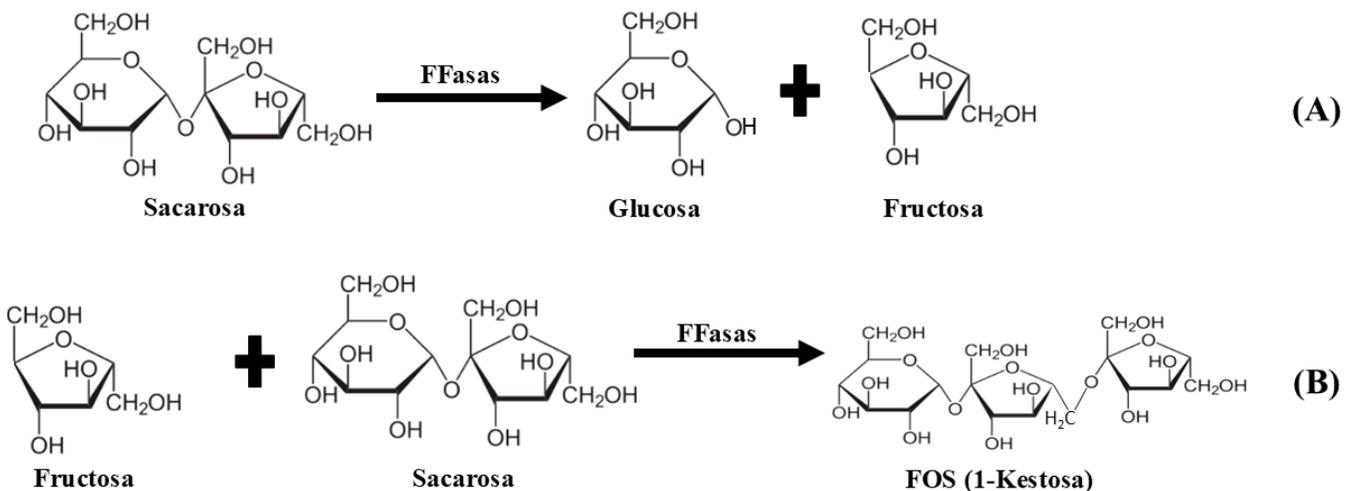
sión de inulina en fructosa, logrando hasta un 95% de fructosa en la hidrólisis completa (Fonseca *et al.*, 2008; Kalil *et al.*, 2001). La actividad enzimática depende del pH y la temperatura, variando con el tipo de sustrato y la enzima utilizada (Rouwenhorst *et al.*, 1998). Para obtener cantidades considerables de inulinasas a gran escala, se debe considerar el rendimiento de los microorganismos seleccionados, la disponibilidad de la materia prima y el costo de producción (Castillo-Calderón y Chamy-Maggi, 2010).



**Figura 7.** Estructura cristalina de la enzima invertasa o FFasa de *S. cerevisiae* S288C (PDB: 4EQV). La imagen muestra la organización cuaternaria de la proteína en su forma oligomérica, con cada subunidad representada en diferentes colores mediante un modelo de cintas (*ribbon model*). La invertasa cataliza la hidrólisis de la sacarosa en glucosa y fructosa, desempeñando un papel esencial en el metabolismo de los carbohidratos en *S. cerevisiae* (PDB, 2013). En la **Figura 8** se muestra la reacción de las enzimas FFasas entre moléculas de sacarosa para la producción de FOS.

## Enzimas con actividad fructosiltransferasa: $\beta$ -fructofuranosidasa o invertasa (FFasa)

La síntesis de FOS mediante enzimas con actividad fructosiltransferasas (FTasas) consiste en una transfructosilación, es decir la transferencia de residuos terminales fructosilo hacia una molécula de sacarosa. Diversos estudios han demostrado la existencia de dos enzimas con actividad fructosiltransferasa: fructosiltransferasas (FTasas) y  $\beta$ -fructofuranosidasas (FFasas) que son capaces de producir FOS. En las levaduras se ha reportado que las enzimas FFasas utilizan la sacarosa como sustrato para producir FOS, hidrolizando los enlaces de su estructura para transferir el residuo fructosil a otra molécula de sacarosa (**Figura 8**). Las FFasas se conocen también como invertasas y a altas concentraciones de sacarosa estas enzimas muestran actividad transfructosilante (Belmonte-Izquierdo, *et al.* 2023). Las FFasas son enzimas extracelulares, se considera que las de origen microbiano son de mayor tamaño en comparación con las de origen vegetal, y que presentan actividad en pH cercanos a 5 y 6.5, así como una temperatura óptima cercana a 45°C (Chacón-Villalobos, 2006). Para obtener una actividad óptima de fructosilación es necesario considerar las variables de tiempo, temperatura, y el sustrato (Peña-Suasnabar y Zavaleta, 2020). Además, las FFasas requieren la presencia de iones como Ca, Mg, Co y Li, sin embargo, su actividad se ve inhibida en presencia de minerales como Pb, Hg, Al y Ag, así como por elevadas concentraciones de glucosa (Chacón-Villalobos, 2006).



**Figura 8.** Mecanismo de transfructosilación catalizado por la enzima FFasa o también conocida como invertasa con acción fructosiltransferasa (FTasa), mostrando tres etapas en la conversión de sacarosa en fructooligosacáridos (FOS). (A) Hidrólisis de la sacarosa: la FFasa rompe la sacarosa, liberando glucosa y un residuo de fructosa activado. (B) Transferencia de fructosa: el residuo de fructosa se transfiere a otra molécula de sacarosa, formando FOS como 1-kestosa.

Actualmente, en la revisión realizada no se encontraron estudios de FFasas de *K. marxianus* en la producción de FOS. Así mismo no se dispone de una estructura cristalina específica de una FFasa de *K. marxianus* en el *Protein Data Bank* (PDB). Sin embargo, la estructura cristalina de una FFasa de *S. cerevisiae* S288C puede observarse en la **Figura 7**.

## Conclusiones

En este trabajo se ha recopilado y analizado información relevante sobre la capacidad que posee la levadura *K. marxianus* para producir enzimas inulinasas y el área de oportunidad para investigar sobre la actividad transfructosilante de sus enzimas FFasas, con miras a la obtención de fructooligosacáridos (FOS). Diversas investigaciones han señalado que los FOS son prebióticos, gran alternativa para combatir el problema de salud pública actual, reforzando el sistema inmune y previniendo enfermedades del sistema colon-rectal, lo que contribuye a tener una vida saludable. Lo anterior debido a que los prebióticos viajan por el tracto digestivo, pero no son absorbidos a través del intestino delgado, lo cual permite potencializar el crecimiento de algunas de las colonias de bifidobacterias y lactobacilos, los cuales habitan en el intestino grueso y hasta el recto. Para una caracterización más precisa de las condiciones óptimas de crecimiento de *K. marxianus*, así como su impacto en la producción de FOS se requiere de estudios experimentales que evalúen variables como temperatura, pH, agitación y nutrientes. La información recopilada en este trabajo destaca el valor de los microorganismos en la obtención de bioproductos de interés biotecnológico.

## Referencias

Belmonte-Izquierdo Y., Salomé-Abarca L.F., González-Hernández J.C., López M.G. (2023). Fructooligosaccharides (FOS) Production by Microorganisms with Fructosyltransferase Activity. *Fermentation* 9(11):968. doi:10.3390/fermentation9110968.

Castillo-Calderón A., Chamy-Maggi R. (2010). Producción de inulinasas por levaduras de *Kluyveromyces marxianus*. *Scientia Agropecuaria* 1(3-4):235-245. doi:10.17268/sci.agropecu.2010.04.07.

Chacón-Villalobos, A. (2006). Perspectivas agroindustriales actuales de los oligofruetosacáridos (FOS). *Agronomía mesoamericana* 17 (2):265-286.

Cazetta M.L., Martins M.M., Monti R., Contiero J. (2005). Yacon (*Polymnia sanchifolia*) extract as a substrate to produce inulinase by *Kluyveromyces marxianus* var. *bulgaricus*. *Journal of Food Engineering* 66:301-305. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.03.022

Fonseca G.G., Heinzle E., Wittmann C., Gombert A. (2008). The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential. *Microbiol Biotechnol* 79:339-354. doi:10.1007/s00253-008-1458-6

Hernández-Colomé I. (2019). Producción de fructanasas en reactor por lotes repetidos con células inmovilizadas de *Kluyveromyces marxianus* a partir de fructanos de *Agave tequilana* (Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara). URL:<https://hdl.handle.net/20.500.12104/83813>

Kalil S.J., Suzan R., Maugeri F., Rodrigues M.I. (2001). Optimization of Inulinase Production by *Kluyveromyces marxianus* Using Factorial Design. *Biochemistry and Biotechnology* 94(3):257-264. doi:10.1385/abab:94:3:257

León-Lira G. (2021). Producción de fructooligosacáridos (FOS) catalizada por la exoinulina de *Kluyveromyces marxianus* AZ8 (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México). URL: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000812124>

Mendoza-Gardeazábal A.S. (2013). Caracterización de la levadura *Kluyveromyces marxianus* como microorganismo prebiótico (Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo). URL:<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/1862/TESIS%20SEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Madrigal L., Sangronis E. (2007). La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 57(4):387-396.

Olvera C., Castillo E., López-Munguía A. (2007) Fructosiltransferasas, fructanas y fructosa. *Biotechnología* 14:327-345.

Peña-Suasnabar C., Zavaleta A.I. (2020). Optimización de la producción de fructooligosacáridos a partir del extracto de algarrobo utilizando fructosiltransferasas. *Revista de la Sociedad Química del Perú* 86(2):192-204.

Protein Data Bank (2019). Crystal structure of endo-inulinase from *Kluyveromyces marxianus*. RCSB PDB. URL: <https://www.rcsb.org/structure/6J0T>

Protein Data Bank (2013). Crystal structure of *Saccharomyces cerevisiae* Invertase. RCSB PDB. URL: <https://www.rcsb.org/3d-view/4EQV/1>.

Rodríguez-Vázquez R.L. (2018). Producción de extractos microbianos con actividad fructanasa para la síntesis de fructooligosacáridos (Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional).

Rouwenhorst R., Visser L.E., Van Der Baan A.A., Scheffers W.A., Van Dijken J.P. (1998). Production, Distribution, and Properties of Inulinase in Continuous Cultures of *Kluyveromyces marxianus* CBS 6556. *Microbiology* 54(5):1131-1137. doi:10.1128/aem.54.5.1131-1137.1988

Singh R.S., Singh R.P. (2017) 18 - Inulinasas. In: Pandey A, Negi S, Soccol CR (eds). *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier, pp 423-446. doi:B978-0-444-63662-1.00018-X

Singh R.S. y Singh R.P. (2010). Production of fructooligosaccharides from inulin by endoinulinasas and their prebiotic potential. *Food Technology and Biotechnology* 48(4):435-450.



# Análisis termodinámico de un sistema geotérmico de doble flash con aporte de calor residual de un ciclo Brayton de múltiples etapas

Thermodynamic analysis of a double-flash geothermal system with residual heat input from a multi-stage Brayton cycle

Irvin Adrián Ríos Domínguez\*, Víctor M. Ambríz Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas, José E. Acosta-Cano-de-los-Ríos, Diva Y. Saucedo Rojo

Tecnológico Nacional de México/I.T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, 31310, Chihuahua, México

## Historial

Manuscrito recibido: 22 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 10 de junio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Irvin Adrián Ríos Domínguez

[adrian\\_rios96@hotmail.com](mailto:adrian_rios96@hotmail.com)

## Resumen

Este artículo presenta el análisis termodinámico de un sistema geotérmico doble flash con aporte de calor residual de un ciclo Brayton de múltiples etapas. Se plantea la recuperación de calor en un arreglo original y otros arreglos como variantes para obtener la configuración más óptima. Los modelos termodinámicos se construyen y se analizan con el software EES. Los resultados muestran que la recuperación de calor puede incrementar el flujo másico de vapor de la turbina de baja presión en 1.6 kg/s. Se encuentra que el sistema geotérmico con recuperación de calor puede alcanzar una producción de potencia de 59,331 kW cuando los separadores 1 y 2 operan a las presiones de separación óptima de 1,467 kPa y 226.7 kPa, respectivamente. Finalmente, se destaca que la recuperación de calor residual puede incrementar la producción de potencia en un 2.62%.

**Palabras clave:** Sistema geotérmico, doble flash, calor auxiliar, ciclo Brayton, análisis termodinámico.

## Introducción

La energía geotérmica se encuentra dentro de las energías renovables con mayor aporte en la producción mundial de electricidad con alrededor de 87 TWh (Paulillo *et al.*, 2020). Hoy en día, los recursos geotérmicos de alta entalpía ( $T > 150$  °C), son los más implementados para la generación de electricidad en el mundo mediante las plantas geotérmicas de simple y doble flash (Coskun *et al.*, 2011). Sin embargo, la cantidad de electricidad que puede producir una planta geotérmica está restringida por la cantidad y características del vapor que es posible enviar al turbogenerador. Este vapor tiene las características de vapor saturado, y de manera natural no

## Abstract

This paper presents the thermodynamic analysis of a double-flash geothermal system with waste heat input from a multistage Brayton cycle. Heat recovery is proposed in an original arrangement and other arrangements are considered as variants to obtain the most optimal configuration. Thermodynamic models are built and analyzed with EES software. The results show that heat recovery can increase the steam mass flow of the low-pressure turbine by 1.6 kg/s. It is found that the geothermal system with heat recovery can achieve a power output of 59,331 kW when separators 1 and 2 operate at the optimum separation pressures of 1,467 kPa and 226.7 kPa, respectively. Finally, it is noted that waste heat recovery can increase the power output by 2.62%.

**Keywords:** Geothermal system, double flash, auxiliary heat, Brayton cycle, thermodynamic analysis.

es posible sobrecalentarlo. En este contexto, la búsqueda de alternativas para mejorar la eficiencia de estas plantas es de suma importancia (Santos *et al.*, 2017).

Los ciclos de potencia, como lo es el ciclo Brayton pueden jugar un papel importante, ya que el calor residual que sale de la turbina de un ciclo Brayton con temperaturas superiores a los 900 K, puede ser reutilizado para sobrecalentar el vapor saturado de una planta geotérmica flash, y en consecuencia incrementar por una parte la producción de potencia de la planta geotérmica flash, y por otra parte el factor de utilización del combustible del ciclo Brayton, así como la eficiencia general de todo el proceso de conversión de energía

térmica a eléctrica (Shan *et al.*, 2019). Adicionalmente, es posible mejorar el proceso de conversión de energía al incrementar las etapas de compresión y expansión del ciclo Brayton, con grandes beneficios en el desempeño termodinámico.

Los sistemas geotérmicos de doble flash y los ciclos de turbina de gas como lo es el ciclo Brayton, son ampliamente operados de manera independiente en la actualidad. Sin embargo, en busca de mejorar el desempeño termodinámico, la comunidad científica ha mostrado un gran interés respecto de estos ciclos termodinámicos. Si bien, hoy en día, existe un concepto similar al del aprovechamiento del calor residual de un ciclo Brayton por un sistema geotérmico doble flash. Este concepto se conoce como ciclo combinado e implica un ciclo Rankine activado con los gases de escape de un ciclo Brayton. La combinación del ciclo Brayton y el ciclo Rankine puede lograr un uso eficiente de la energía (Sachdeva y Singh, 2019). Esta combinación (ciclo combinado) ha sido muy estudiada y existe una gran variedad de trabajos en la literatura. Sin embargo, la configuración y arreglo para aprovechar el calor residual del ciclo Brayton por el sistema geotérmico doble flash difiere en gran medida al concepto de ciclo combinado.

Es por lo anterior, y debido a que no se han encontrado sistemas reportados en la literatura de libre acceso, que los antecedentes de este trabajo presentan información para cada ciclo por separado. Para los sistemas geotérmicos de doble flash (DF) Dagdas (2007) realizó un análisis de rendimiento. Los resultados indican una potencia de 11,488 kW y una eficiencia por primera ley de 6.88%. También muestran que las presiones de separación óptimas son 530 kPa y 95 kPa, respectivamente. Laudon *et al.* (2008) realizaron el análisis de la Planta de DF de Sabalan, Irán. Los resultados sugieren eficiencia energética global de 9.4% y una potencia de salida de 54 MW con presiones de 5.5, 0.9 y 0.1 bar para etapas de alta y baja presión y condensador. Yari (2010) realizó otro estudio y encontró una eficiencia en el rango de 10.95 a 14.26% y un trabajo específico neto de 96.95 kJ/kg. Pambudi *et al.* (2013) presentaron una evaluación de la planta DF de Dieng, Indonesia. Obtuvieron eficiencia energética total del 40.90% y una potencia de 34.76 MW a una presión óptima de separación de 1.43 bar. Parikhani *et al.* (2021) realizaron una optimización para la mejora del rendimiento de una planta DF. Los resultados demuestran un aumento de la potencia de 7.96% en comparación del caso sin optimizar, a unas presiones de separación óptimas de 244.7 y 78.42 kPa, respectivamente. Colorado-Garrido *et al.* (2021) realizaron un análisis termodinámico de la planta DF de Cerro Prieto,

México. En el estudio se demostró que la planta alcanza una potencia neta de 117,860 kW y una eficiencia del 36.43% a una presión del separador de baja presión de 385 kPa. Finalmente, Javadi *et al.* (2021) efectuaron un análisis termodinámico en el software EES de un nuevo sistema multi-generación, basado en una central geotérmica DF. Los resultados muestran que el sistema genera 43,640 kW de electricidad, y alcanza una eficiencia energética del 19%. Además, la mayor producción de potencia y la mayor eficiencia se obtienen en un rango de presión del separador flash de 650 a 750 kPa.

Para el ciclo Brayton la literatura existente sugiere diversos análisis termodinámicos. Un ejemplo es el trabajo realizado por Chandra y Kaushik (2013) donde se estudió un ciclo Brayton con recalentador, regenerador e interenfriador. Encontraron que los efectos del regenerador, interenfriador y recalentador son significativos y que la eficiencia energética puede alcanzar una magnitud de hasta 44.99%. Živić *et al.* (2014) presentaron otra investigación detallando el efecto de la eficiencia isoentrópica de la turbina y del compresor sobre la eficiencia térmica del ciclo. Observaron que el aumento de la eficiencia isoentrópica de la turbina tiene un mayor impacto en el aumento del trabajo neto que el aumento de la eficiencia del compresor. La eficiencia máxima lograda en sus análisis para el ciclo Brayton sugiere un desempeño del 41.9%. Goodarzi *et al.* (2014) realizaron una investigación de un ciclo Brayton regenerativo modificado. En su trabajo, sugieren que se puede generar una potencia y eficiencia más favorables ajustando la relación de flujo másico de derivación. Como resultado, obtuvieron que la eficiencia y el trabajo específico son superiores a 52% y 340 kJ/kg, respectivamente. Oliveira *et al.* (2015) estudiaron un ciclo Brayton irreversible con procesos de regeneración, enfriamiento intermedio y recalentamiento. Encontraron que el aumento de la eficiencia del proceso de expansión como la compresión eleva significativamente el rendimiento del ciclo. Chandramouli *et al.* (2015) efectuaron un análisis termodinámico de una variante de ciclo Brayton. Los resultados demuestran que la eficiencia lograda a través del ciclo modificado con 2 etapas de compresión es solo un 2.2% menor que la eficiencia lograda a través de la compresión isotérmica ideal para una relación de presiones de 3 y una temperatura de entrada a la turbina de 1,200 K. Živić *et al.* (2016) realizaron una investigación para un ciclo Brayton con propiedades variables. Sus resultados sugieren una eficiencia máxima de 43% a una temperatura máxima del ciclo de 1,200 °C y una relación de presiones de 24. Finalmente, Mossi Idrissa y Goni Boulama (2019)

presentaron un análisis de un ciclo Brayton utilizando un enfoque termodinámico avanzado. Los resultados indican que la eficiencia energética total se calculó en 36.65%, mientras que el caudal másico de aire a través del compresor y el consumo de combustible requerido fueron de 311.10 kg/s y 5.95 kg/s, respectivamente.

La revisión de la literatura muestra un vacío existente respecto a la evaluación termodinámica de sistemas geotérmicos de doble flash con aporte de calor residual de un ciclo Brayton de múltiples etapas. Lo anterior, ha motivado a los autores de este trabajo en contribuir a llenar ese vacío y a realizar un análisis termodinámico de la combinación de estos dos ciclos con la finalidad de incrementar la producción de potencia del sistema geotérmico de doble flash, y también con el propósito de incrementar la eficiencia global del sistema propuesto. El acoplamiento de los ciclos, es una propuesta teórica, y para determinar la viabilidad termodinámica de la propuesta se tienen los siguientes objetivos; i) análisis termodinámico por primera ley (análisis de energía)

para identificar las magnitudes de los productos energéticos de los ciclos e interacciones energéticas entre componentes; ii) análisis de tres arreglos diferentes de aprovechamiento del calor residual del ciclo Brayton, en diferentes partes del sistema geotérmico doble flash. Esto con la finalidad de determinar la ubicación óptima del aprovechamiento del calor residual, que permita al sistema geotérmico alcanzar el mejor desempeño termodinámico.

**Descripción del sistema geotérmico**

El sistema se compone por una planta geotérmica de doble flash y un ciclo Brayton de múltiples etapas (Figura 1). Para la activación del sistema, se considera un recurso geotérmico característico de los yacimientos geotérmicos ubicados en Los Azufres, Michoacán. La temperatura de estos campos puede ser de 220 °C y superior a los 100 kg/s (DiPippo, 2013). Debido a que el fluido geotérmico se encuentra en boca de pozo (estado 1) en condiciones de líquido dominante, es necesario

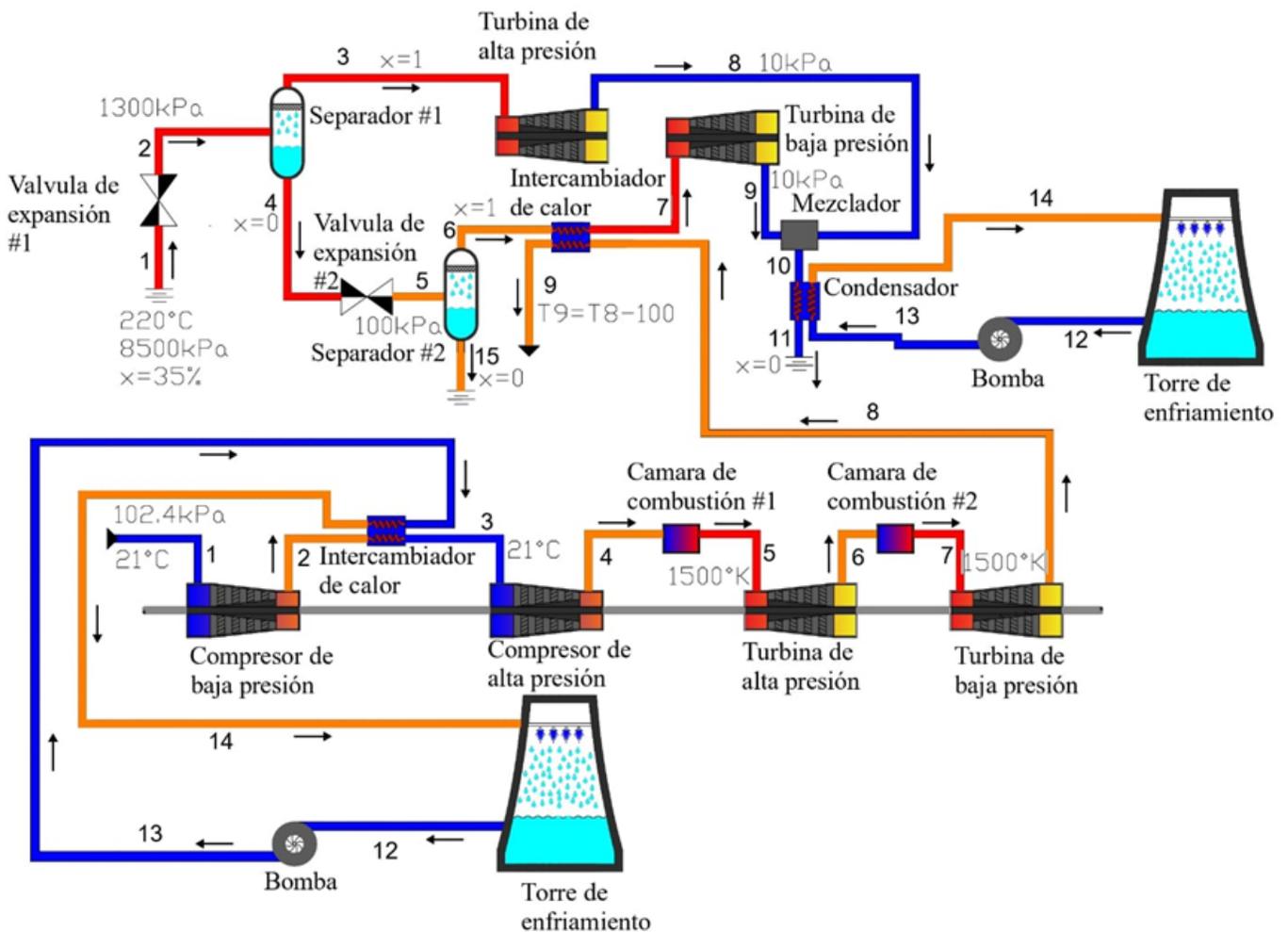


Figura 1. Diagrama del sistema geotérmico.

incluir una válvula de expansión para reducir la presión al menos 10 veces y lograr incrementar la calidad del fluido geotérmico en el estado 2. Lo anterior facilita al separador #1 la separación del fluido geotérmico en líquido saturado (estado 4) y vapor saturado (estado 3). El vapor saturado, por su parte, ingresa a la turbina de alta presión para generar electricidad, mientras que el líquido saturado se pasa por otra válvula de expansión #2, con la finalidad de reducir la presión y adquirir las características termodinámicas adecuadas para ingresar a otro separador #2. Una vez que se tiene la segunda separación, en el separador #2, el vapor saturado es destinado a una turbina de baja presión y generar electricidad nuevamente. Es necesario resaltar que antes de ingresar el vapor saturado en la turbina de baja presión, el vapor es sobrecalentado a partir del calor residual de un ciclo Brayton de múltiples etapas. Este sobrecalentamiento se efectúa en el intercambiador de calor mostrado en la **Figura 1**. En este arreglo del diseño térmico de aporte de calor residual y acoplamiento de los ciclos doble Flash y Brayton, radica la innovación de este trabajo. La finalidad es aprovechar de manera indirecta los gases calientes desechados del ciclo Brayton para incrementar la producción de potencia de la turbina de baja presión.

**Variaciones en las configuraciones del sistema geotérmico**

Para el aporte de calor auxiliar y evaluar el desempeño termodinámico del sistema geotérmico en combinación

con el ciclo Brayton, se han propuesto tres variantes diferentes.

**Arreglo 1 (A1)**

Este arreglo A1, consiste en la reubicación del intercambiador de calor a antes del separador #2 y después de la válvula de expansión #2, como se muestra en la **Figura 2**.

**Arreglo 2 (A2)**

Este arreglo A2, consiste en la reubicación del mezclador al final de la turbina de alta presión y el intercambiador de calor después del mezclador, antes de la turbina de baja presión, como se muestra en la **Figura 3**.

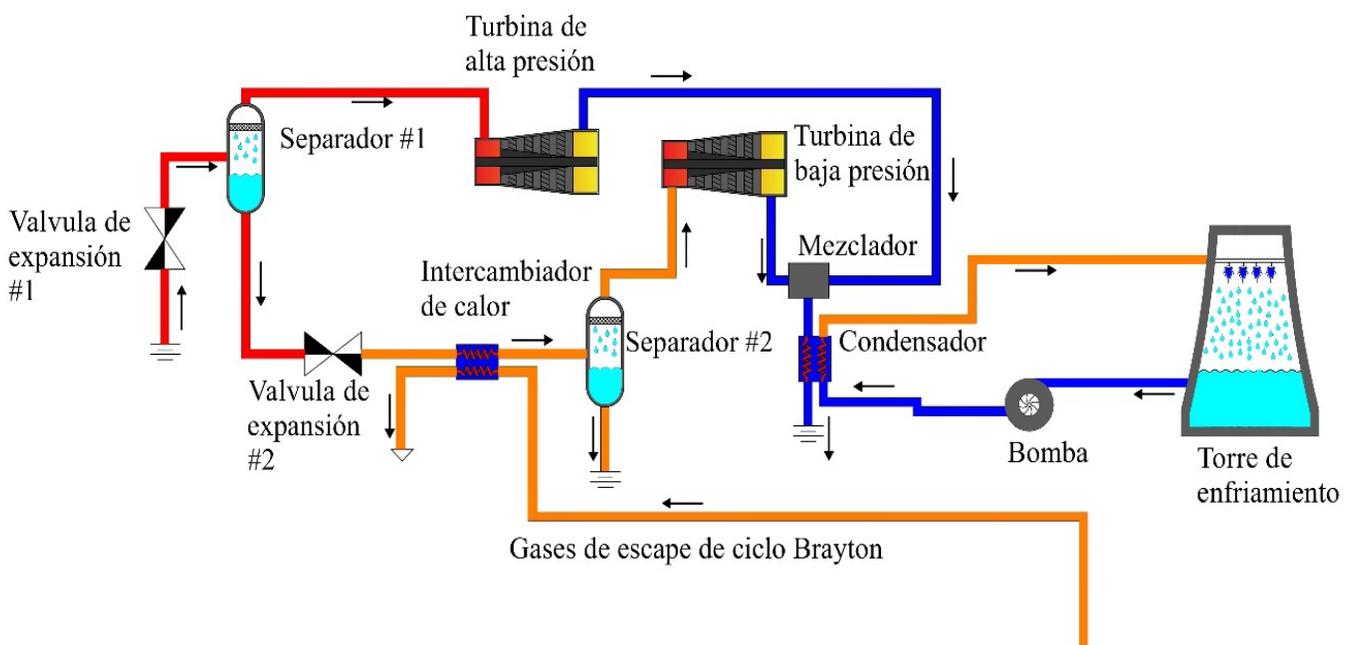
**Arreglo 3 (A3)**

Este arreglo A3 se muestra en la **Figura 4**, consiste en evaluar el sistema geotérmico doble flash sin el aporte de calor auxiliar por parte del ciclo Brayton.

**Consideraciones generales para el modelado**

Las principales consideraciones de operación del sistema geotérmico y ciclo Brayton se muestran a continuación y en las **Tablas 1 y 2** (DiPippo, 2013; Zivić *et al.*, 2014; Chandra y Kaushik, 2013):

- Se ha despreciado la energía cinética y potencial, y el modelo se ha desarrollado bajo condiciones de estado estable.
- Las pérdidas de presión en componentes y tuberías



**Figura 2.** Configuración geotérmica para el A1.

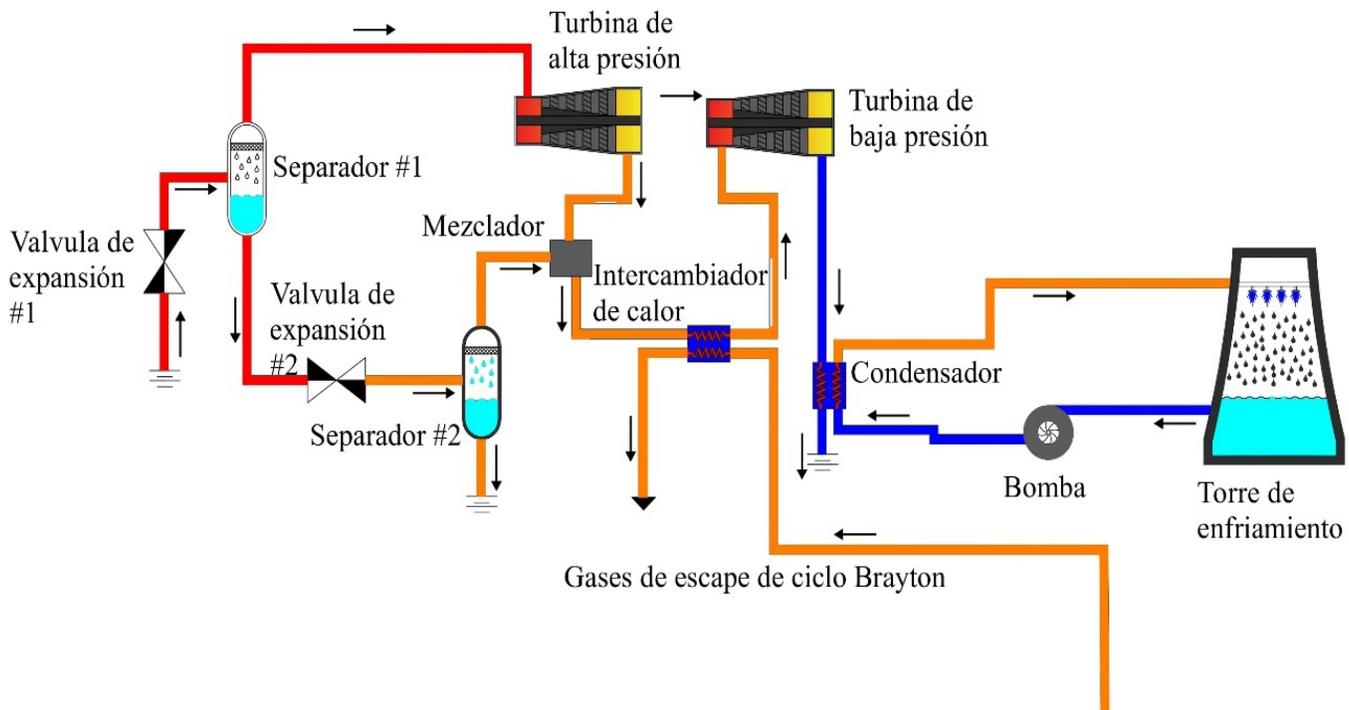


Figura 3. Configuración geotérmica para el A2.

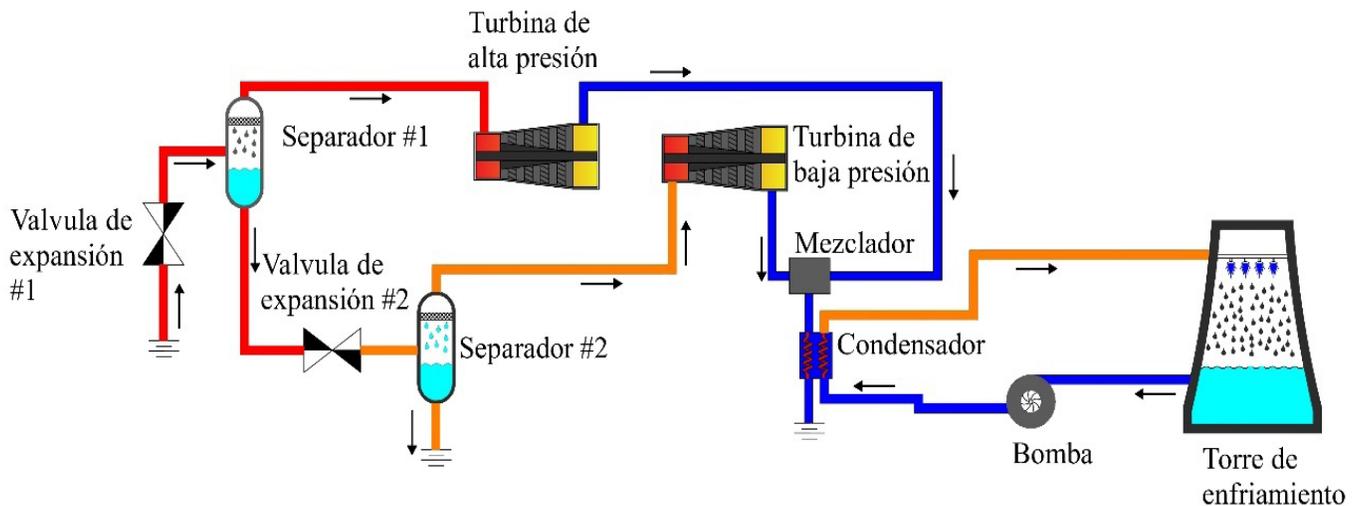


Figura 4. Configuración geotérmica para el A3.

- son despreciadas.
- El fluido geotérmico se modela utilizando las propiedades del vapor de agua.
- El flujo másico del sistema geotérmico se estableció en 100 kg/s.
- El fluido del ciclo Brayton se modela como aire estándar.
- Se asume un  $C_p=1.005 \text{ kJ/kg K}$ , para el fluido de trabajo del ciclo Brayton.

### Modelado termodinámico

El modelado termodinámico se ha desarrollado en el software Engineering Equation Solver (EES). El EES permite el cálculo de las propiedades termodinámicas, además de que permite resolver las ecuaciones definidas en esta Sección 3.

### Balances de masa y energía

El modelado termodinámico se ha establecido a partir de la primera ley de la termodinámica y la ecuación de conservación de la masa, Ecuación (1) y Ecuación (2):

**Tabla 1.** Parámetros considerados para el sistema DF

| Parámetros                          | Magnitud  |
|-------------------------------------|-----------|
| Temperatura de extracción           | 220 °C    |
| Presión de extracción               | 8,000 kPa |
| Presión de la turbina de alta       | 1,300 kPa |
| Presión de la turbina de baja       | 100 kPa   |
| Presión a la salida de las turbinas | 10 kPa    |

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gZ \right) - \sum_s \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gZ \right) = 0 \quad (1)$$

$$0 = \sum_e \dot{m} - \sum_s \dot{m} \quad (2)$$

### Ciclo Brayton

En la **Tabla 3**, se establecen los balances de masa y energía del ciclo Brayton, para cada uno de sus elementos.

### Sistema doble Flash

En la **Tabla 4**, se establecieron los balances de masa y energía para el sistema geotérmico de doble flash.

### Sistema de enfriamiento

La finalidad del modelado del sistema de enfriamiento es determinar el flujo másico de agua de enfriamiento que demandan los ciclos que constituyen el sistema. El agua de enfriamiento para ambos ciclos, se puede determinar mediante un balance de energía en el condensador e

**Tabla 2.** Parámetros considerados para el ciclo Brayton.

| Parámetros   | Magnitud  |
|--|-----------|
| Temperatura de entrada de aire                           | 21°C      |
| Relación de presiones para compresores y turbinas mínima | 6         |
| Temperatura máxima                                       | 1,500 °K  |
| Presión de entrada                                       | 101.9 kPa |

interenfriador, mediante la Ecuación (3):

$$\dot{m}_{agua} = \frac{\dot{Q}_{out}}{(\Delta h)_{agua}} \quad (3)$$

### Sistema global

La **Tabla 5**, resume las ecuaciones para el desempeño termodinámico para cada ciclo del sistema, y también el desempeño termodinámico alcanzado por el sistema global implementando la recuperación de calor residual.

## Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados y discusión para el sistema geotérmico, se organizan por el tipo de arreglo implementado (Subsección 4.1 a 4.4), esto con la finalidad de observar la influencia de la recuperación de calor residual del ciclo Brayton de múltiples etapas en el sistema geotérmico DF. De manera adicional, se presentan las características termodinámicas de los sistemas auxiliares, como lo son los sistemas de enfriamiento de ambos ciclos integrados. Finalmente, se presenta una discusión final comparativa sobre las configuraciones geotérmicas.

**Tabla 3.** Balances de masa y energía del ciclo Brayton.

| Componente              | Masa                    | Energía   |
|-------------------------|-------------------------|---|
| Compresor 1             | $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ | $\dot{W}_{c1} = \dot{m}_1 \cdot C_p (T_2 - T_1)$                                    |
| Interenfriamiento       | $\dot{m}_3 = \dot{m}_2$ | $\dot{Q}_{out1} = \dot{m}_2 \cdot C_p (T_2 - T_3)$                                  |
| Compresor 2             | $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ | $\dot{W}_{c2} = \dot{m}_3 \cdot C_p (T_4 - T_3)$                                    |
| Cámara de combustión 1  | $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ | $\dot{Q}_1 = \dot{m}_4 \cdot C_p (T_5 - T_4)$                                       |
| Turbina de alta presión | $\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ | $\dot{W}_{t1} = \dot{m}_5 \cdot C_p (T_5 - T_6)$                                    |
| Cámara de combustión 2  | $\dot{m}_6 = \dot{m}_7$ | $\dot{Q}_2 = \dot{m}_6 \cdot C_p (T_7 - T_6)$                                       |
| Turbina de baja presión | $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ | $\dot{W}_{t2} = \dot{m}_7 \cdot C_p (T_7 - T_8)$                                    |
| Intercambiador          | $\dot{m}_8 = \dot{m}_9$ | $\dot{Q}_{Out2} = \dot{m}_8 \cdot C_p (T_8 - T_9)$                                  |
| Ciclo                   | -                       | $\dot{W}_{Brayton} = (\dot{W}_{t1} + \dot{W}_{t2}) - (\dot{W}_{c1} + \dot{W}_{c2})$ |

**Tabla 4.** Balances de masa y energía del sistema DF.

| Componente              | Masa                                   | Energía   |
|-------------------------|--|---|
| Válvula de expansión 1  | $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$                | -   |
| Separador 1             | $\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4$    | $\dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_4 \cdot h_4$       |
| Turbina de alta presión | $\dot{m}_3 = \dot{m}_8$                | $\dot{W}_{t1} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_8)$                            |
| Válvula de expansión 2  | $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$                | -   |
| Separador 2             | $\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{15}$ | $\dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{15} \cdot h_{15}$ |
| Intercambiador de calor | $\dot{m}_6 = \dot{m}_7$                | $\dot{Q}_{in} = \dot{m}_6 \cdot (h_7 - h_6)$                            |
| Turbina de baja presión | $\dot{m}_7 = \dot{m}_9$                | $\dot{W}_{t2} = \dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_9)$                            |
| Mezclador               | $\dot{m}_{10} = \dot{m}_9 + \dot{m}_8$ | $\dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{15} \cdot h_{15}$ |
| Condensador             | $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{10}$          | $\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{10} \cdot (h_{10} - h_{11})$                  |
| Ciclo                   | -                                      | $\dot{W}_{DF} = \dot{W}_{t1} + \dot{W}_{t2}$                            |

**Tabla 5.** Desempeño energético por primera ley de la termodinámica.

| Ciclo termodinámico | Eficiencia  |
|---------------------|---|
| Doble flash         | $\eta_{DF} = \frac{\dot{W}_{DF}}{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_0)}$  |
| Brayton             | $\eta_{Brayton} = \frac{\dot{W}_{Brayton}}{(\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2)}$  |
| Sistema global      | $\eta_{Sistema} = \frac{\dot{W}_{DF} + \dot{W}_{Brayton}}{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_0) + (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2)}$ |

**Resultados termodinámicos para el arreglo original (DF + Brayton)**

La **Tabla 6**, muestra los resultados para las propiedades del arreglo original DF. Se puede destacar la variación de las propiedades termodinámicas del estado 7 debido al aporte de calor residual del ciclo Brayton. Debido a la recuperación de calor residual, el vapor geotérmico logra incrementar su temperatura desde 99.61 °C hasta 242 °C. Esto se observa en un incremento considerable de la entalpía desde 2,675 kJ/kg hasta 2,958 kJ/kg. También, se observa un incremento en la entropía desde 7.359 kJ/kg-K hasta 8.002 kJ/kg-K. Cabe destacar que debido al aporte de calor residual el vapor geotérmico alcanza la región de vapor sobrecalentado, lo que no es posible alcanzar en este tipo de plantas debido a la naturaleza de separación del vapor y el líquido en los componentes separadores.

La **Tabla 7**, muestra las propiedades termofísicas del ciclo Brayton de múltiples etapas operando con un flujo másico de aire a 30 kg/s. El estado termodinámico 8, es

el que representa la calidad termodinámica de la energía que activa el intercambiador que permite la recuperación de calor del sistema geotérmico DF. En esta dirección, se puede apreciar, que la temperatura del estado 8 es de 828.1 K (554.95 °C), lo que es suficiente para lograr incrementar una temperatura de 99.61 °C del vapor geotérmico.

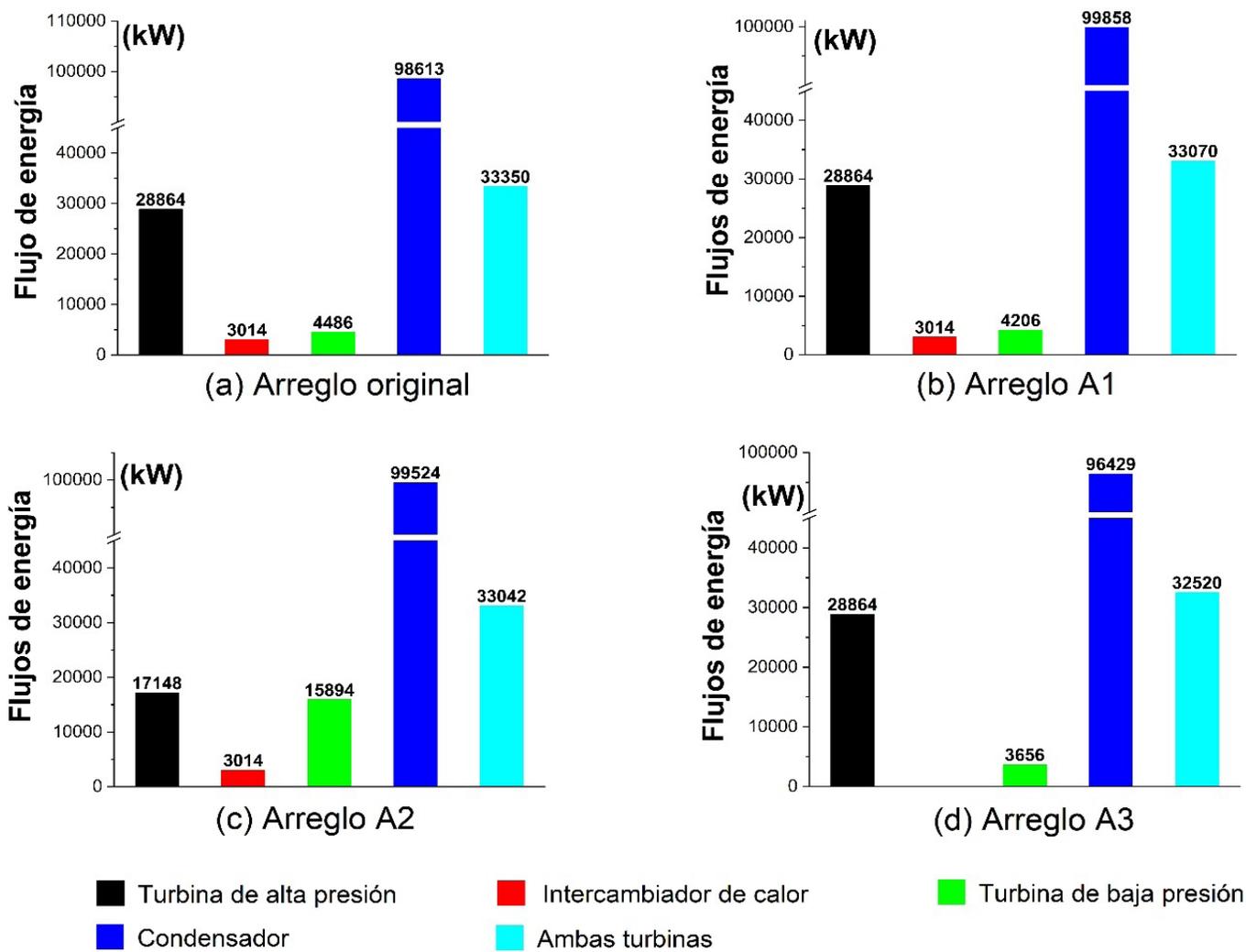
La **Figura 5a**, muestra los resultados obtenidos para los flujos de energía del sistema geotérmico del arreglo original presentado en la **Figura 1**. Se puede apreciar que el mayor flujo de energía está representado por el condensador (calor rechazado), mientras que la turbina con mayor producción de potencia es la turbina de alta presión, que alcanza una producción de potencia equivalente al 86.54% del sistema DF. Por su parte, la turbina de baja presión alcanza solamente el 13.45% de la potencia del sistema DF. Ambas turbinas logran producir 33,350 kW. Por otra parte, el calor residual alcanza 3,014 kW, y esta magnitud es la misma para todas las configuraciones debido a que se modeló bajo los mismos parámetros termodinámicos.

La **Figura 6**, muestra los resultados para los flujos de energía del ciclo Brayton integrado en la configuración geotérmica del arreglo original y el resto de todos los arreglos. Se puede apreciar que el mayor flujo de energía del ciclo se presenta en la cámara de combustión 1, alcanzando una magnitud de 30,435 kW. De esta magnitud se logra obtener en potencia neta útil la magnitud de 25,260 kW (25.26 MW). En potencia bruta, las turbinas aportan 38,379 kW, distribuidos en las turbinas de alta y baja presión en 47.21 y 52.78 %, respectivamente. Lo anterior, indica un consumo de potencia de los compresores equivalente a un trabajo de retroceso de 65.81% y una eficiencia térmica del ciclo Brayton del 52.02%.

**Resultados termodinámicos para el arreglo A1 (DF)**

**Tabla 6.** Propiedades termofísicas del arreglo geotérmico original doble flash.

| Estado                 | Temperatura (°C) | Presión (kPa) | Entalpía (kJ/kg) | Entropía (kJ/kg-k) | Calidad (-) | Flujo másico (kg/s) |
|------------------------|------------------|---------------|------------------|--------------------|-------------|---------------------|
| 1                      | 220              | 8,500         | 1,594            | 3.836              | 0.35        | 100                 |
| 2                      | 191.6            | 1,300         | 1,594            | 2.251              | 0.3949      | 100                 |
| 3                      | 191.6            | 1,300         | 2,787            | 6.495              | 1           | 39.49               |
| 4                      | 191.6            | 1,300         | 814.9            | 2.251              | 0           | 60.51               |
| 5                      | 99.61            | 100           | 814.9            | 1.302              | 0.176       | 60.51               |
| 6                      | 99.61            | 100           | 2,675            | 7.359              | 1           | 10.65               |
| 7                      | 242              | 100           | 2,958            | 8.002              | *           | 10.65               |
| 8                      | 45.79            | 10            | 2,056            | 6.495              | 0.7794      | 39.49               |
| 9                      | 45.79            | 10            | 2,537            | 8.002              | 0.9804      | 10.65               |
| 10                     | 45.79            | 10            | 2,158            | 6.815              | 0.8221      | 50.14               |
| 11                     | 45.79            | 10            | 191.7            | 0.6489             | 0           | 50.14               |
| * Vapor sobrecalentado |                  |               |                  |                    |             |                     |



**Figura 5.** Flujos de energía del sistema geotérmico original y arreglos A1, A2 y A3.

**Tabla 7.** Propiedades termodinámicas del ciclo Brayton.

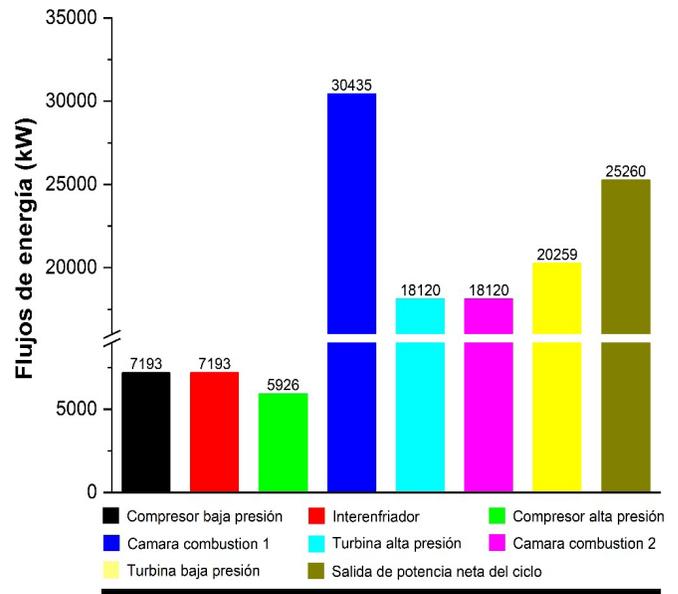
| Estado | Temperatura (K) | Presión (kPa) |
|--------|-----------------|---------------|
| 1      | 294             | 101.9         |
| 2      | 532.6           | 815.2         |
| 3      | 294             | 815.2         |
| 4      | 490.5           | 4,891         |
| 5      | 1,500           | 4,891         |
| 6      | 899             | 815.2         |
| 7      | 1,500           | 815.2         |
| 8      | 828.1           | 101.9         |
| 9      | 728.1           | 101.9         |

Mientras que en el arreglo original el fluido geotérmico llega inmediatamente después de abandonar la válvula, en el arreglo A1 el fluido geotérmico sufre un calentamiento antes de ingresar al segundo separador. Esto tiene como beneficio un incremento en la entalpía de 59.7 kJ/kg antes de ingresar al segundo separador, un incremento en la entropía de 1.227 kJ/kg-K, un incremento en la calidad del vapor de 2.65% y un incremento del flujo másico de vapor de 1.6 kg/s a la salida del segundo separador.

La **Figura 5(b)**, muestra los resultados de los flujos de energía para el arreglo A1 del sistema geotérmico DF con la recuperación de calor de los gases de escape a través del fluido geotérmico antes del segundo separador. En este arreglo la turbina de alta presión alcanza los 28,864 kW y la turbina de baja presión los 4,206 kW, donde en conjunto logran la producción total de 33,070 kW. Lo anterior, representa que la turbina de alta presión y baja presión aportan el 87.28% y 12.72% de la potencia del sistema DF.

**Resultados termodinámicos para el arreglo A2 (DF)**

En el Arreglo A2, el intercambiador de calor utilizado para recuperar el calor residual del ciclo Brayton se localiza después de la turbina de alta presión y del segundo separador flash. Esto trae como beneficio un mayor flujo másico de vapor en la admisión de la turbina de baja presión. Mientras que en el arreglo original el flujo másico de admisión de la segunda turbina es de 10.65 kg/s, en el arreglo A2 el flujo se incrementa hasta los 50.14 kg/s. Sin embargo, debido a esta cantidad de flujo, la calidad del vapor disminuye en comparación a la del arreglo original, así como también se observa una disminución en la temperatura, la entropía y la entalpía. Cabe resaltar que el aporte de calor residual logra un incremento del 3% en la calidad del vapor, lo cual resulta como beneficio para la turbina de baja presión.



**Figura 6.** Flujos de energía en el ciclo Brayton.

La **Figura 5(c)**, muestra los resultados para los flujos de energía del arreglo A2, se puede apreciar que la turbina de alta presión logra un producto de 17,148 kW, mientras que la turbina de baja presión alcanza 15,894 kW. En conjunto, ambas turbinas alcanzan 33,042 kW, lo que representa el producto del sistema DF. De esta magnitud, el 51.89% de potencia lo produce la turbina de alta presión y el 48.1% la turbina de baja presión. Se puede destacar que el aporte de calor residual en esta configuración incrementa la producción de potencia de la segunda turbina.

**Resultados termodinámicos para el arreglo A3 (DF)**

El Arreglo A3 se ha analizado para obtener el desempeño termodinámico del sistema geotérmico doble flash sin aporte de calor residual del ciclo Brayton. Se puede apreciar respecto del arreglo original, una notable disminución en la temperatura del vapor de admisión de la turbina de baja presión, así como también la disminución de otras magnitudes físicas como lo son la entalpía, la entropía y la calidad del vapor. Lo que indica las ventajas del aporte de calor residual de los otros arreglos sobre el arreglo A3.

La **Figura 5(d)**, muestra los resultados de los flujos de energía del arreglo A3. Se puede apreciar que el sistema geotérmico DF operando bajo este arreglo, alcanza una menor producción de potencia en comparación de las otras configuraciones. La potencia que logra producir este arreglo sin aporte de calor residual es de 32,520 kW, distribuidos en 88.72% en la turbina de alta presión y 11.24% en la turbina de baja presión.

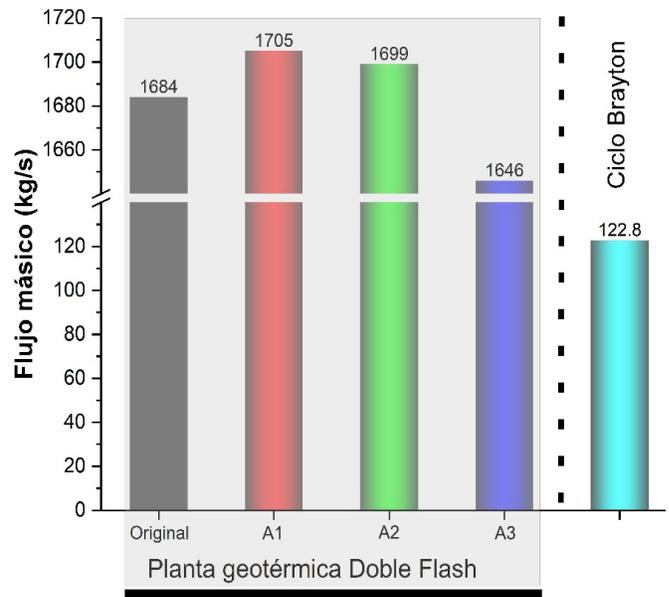
### Resultados del sistema de enfriamiento

La **Figura 7** muestra los resultados para el flujo másico de agua de enfriamiento requeridos por cada configuración. La configuración que tiene una mayor demanda de agua de enfriamiento, es la configuración A1, seguida en una menor proporción por la configuración A2 y finalmente la configuración A3 y el arreglo original. En el caso del flujo másico requerido por el arreglo original, resulta una magnitud de 1,684 kg/s. Lo que representa una menor cantidad de flujo másico de 1.24% respecto del arreglo A1 y un 0.8% respecto del arreglo A2. Por su parte, el ciclo Brayton demanda una menor cantidad de agua de enfriamiento debido a la cantidad de energía que se disipa en el interenfriador, esta cantidad asciende a los 122.8 kg/s, lo que equivale a 13.88 veces menos que el agua de enfriamiento demandada por el arreglo A1.

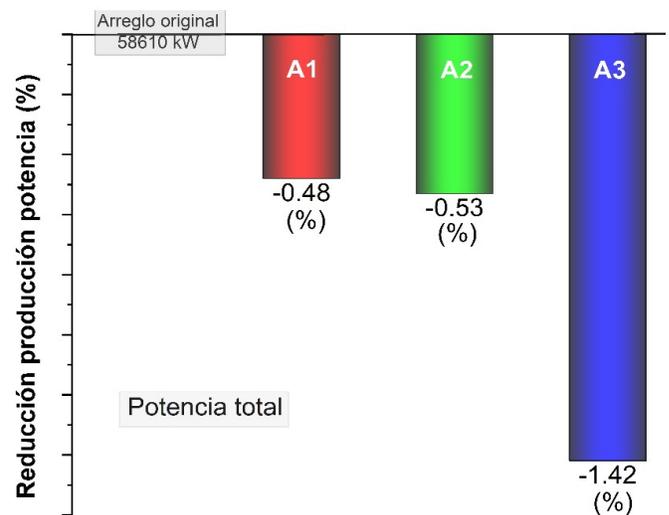
### Comparativa de los arreglos e influencia de la presión de separación

En esta Subsección, se presenta una comparativa de los arreglos analizados e influencia de la presión de los separadores en el desempeño del sistema geotérmico con recuperación de calor residual del ciclo Brayton. Básicamente en este trabajo, se planteó una configuración en arreglo original para el análisis termodinámico y algunas variantes a esta configuración (Arreglos A1 y A2) con la finalidad de encontrar la ubicación óptima del intercambiador recuperador de calor de los gases de escape en el sistema geotérmico. También se planteó, el análisis termodinámico de los ciclos operando de manera separada, es decir, sin recuperación de calor, esta forma de operación la representa el arreglo A3. Derivado de lo anterior, los resultados demuestran que el arreglo original que implica la recuperación de calor después del separador geotérmico es el más viable termodinámicamente. Este arreglo logra una producción total entre ambos ciclos de 58,610 kW. Mientras que el resto de las configuraciones logran una menor cantidad de potencia. Por ejemplo, el arreglo A1 alcanza una producción de 58,330 kW, el arreglo A2 de 58,302 kW y finalmente el arreglo A3 alcanza 57,780 kW. La **Figura 8**, muestra en porcentaje la reducción de potencia producida por los diferentes arreglos respecto del arreglo original.

También, durante el análisis, se logró detectar que las presiones de los separadores #1 y #2 pueden contribuir significativamente en el desempeño termodinámico de los diferentes arreglos geotérmicos, por lo que se realizaron una serie de interacciones para determinar las presiones de separación que brindan el mejor desempeño del sistema DF. Estas interacciones se aplicaron para el arreglo original por ser el mejor candidato para la



**Figura 7.** Flujos másicos del sistema de enfriamiento.



**Figura 8.** Variación en la producción de potencia de las diferentes configuraciones.

generación de energía bajo este esquema de recuperación de calor. Se encontró que la presión del separador #1 óptima es de 1,467 kPa y la del separador #2 de 226.7 kPa (**Figura 9**). Bajo estos parámetros en las presiones de separación, el arreglo original logra una producción de potencia en la turbina de alta presión de 28,911 kW y en la turbina de baja presión de 5,160 kW, y donde en conjunto logran la producción de 34,071 kW por parte del sistema geotérmico DF. Esta magnitud al unirla con la potencia del ciclo Brayton alcanza la cantidad total de los 59,331 kW, lo que representa mayores ventajas sobre los otros arreglos, hasta el 2.62 % respecto del arreglo A3.

Finalmente, cabe mencionar que, con las potencias

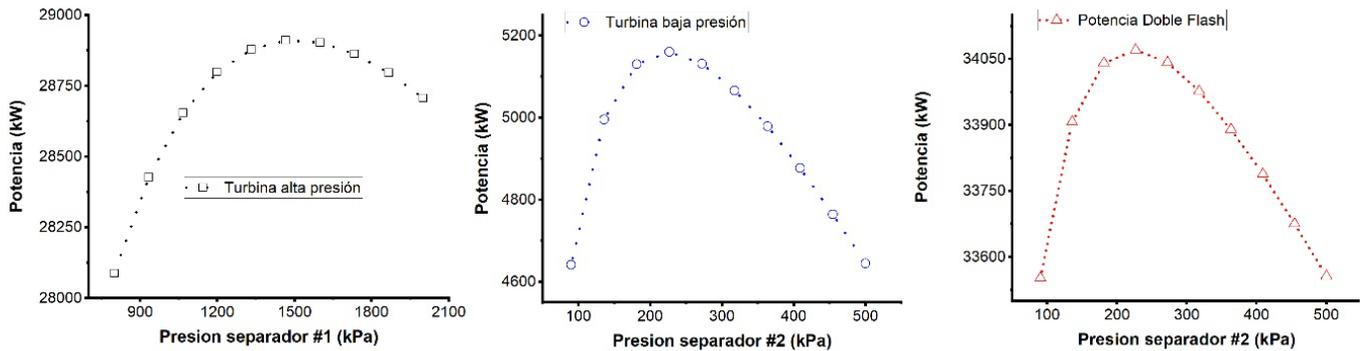


Figura 9. Variación de la producción de potencia vs presiones de los separadores.

logradas por los diferentes arreglos, el desempeño termodinámico que alcanza el arreglo A3 sin recuperación residual equivale a una eficiencia energética de 21.84%. Sin embargo, al implementar la recuperación de calor residual el arreglo original puede alcanzar una eficiencia energética equivalente al 29.68%. Lo anterior, demuestra la viabilidad energética de la propuesta implementada en este trabajo al lograr incrementar la eficiencia del sistema en 7.84%.

## Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado desde el punto de vista termodinámico un sistema geotérmico DF el cual aprovecha los gases de escape de un ciclo Brayton para aumentar la generación de potencia, así como tres arreglos diferentes del mismo sistema, para determinar el mejor desempeño termodinámico. Al evaluar los sistemas por separado (arreglo A3) generan en su totalidad una cantidad de 57,780 kW, mientras que al implementar la recuperación de calor mediante un intercambiador de calor después del separador #2 (arreglo original) el sistema logra una generación de potencia total de 58,610 kW. Por otra parte, si el intercambiador de calor es ubicado antes del separador con la finalidad de obtener una mayor cantidad de vapor (arreglo A1), se alcanza un total de 58,330 kW. En otra dirección, si el mezclador del sistema DF se ubica antes del intercambiador de calor se genera un total de 58,302 kW (arreglo A2). A pesar de tener potencias muy similares, el arreglo A2 no es muy eficiente, no sólo por el hecho de que genera menos potencia, también se le atribuye el hecho de que el vapor ingresa a la turbina de baja presión con una calidad inferior. En el arreglo original, se obtiene la mayor generación de potencia por el hecho de recalentar el vapor utilizado en la turbina de baja presión. Cabe resaltar que, al unir estos dos sistemas bajo el arreglo original propuesto, podría representar un buen aprovechamiento de los yacimientos geotérmicos.

Finalmente, una adecuada elección de las presiones de los separadores podría mejorar dicho aprovechamiento.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM) – Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

## Referencias

- Chandra H, Kaushik SC (2013). Exergetic analysis of closed Brayton thermal power cycle with reheater, regenerator and intercooler. *International Journal of Ambient Energy* 34(3):122–130. doi:10.1080/01430750.2012.740426.
- Chandramouli R, Srinivasa Rao MSS, Ramji K. (2015). Energy and exergy based thermodynamic analysis of reheat and regenerative Braysson cycle. *Energy* 90:1848–1858. doi:10.1016/j.energy.2015.07.017.
- Colorado-Garrido D, Alcalá-Perea G, Alaffita-Hernández FA, Escobedo-Trujillo BA (2021). Exergy analysis using a theoretical formulation of a geothermal power plant in Cerro Prieto, México. *Entropy* 23(9). doi:10.3390/e23091137.
- Coskun C, Oktay Z, Dincer I (2011). Performance evaluations of a geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering* 31(17-18):4074-4082. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.08.013.
- Dagdas A (2007). Performance analysis and optimization of double-flash geothermal power plants. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* 129(2):125-133. doi:10.1115/1.2719204.
- Oliveira S, Luiz Scalón V, Pereira Repinaldo V (2015). Ecological optimization of an irreversible Brayton cycle with regeneration, inter-cooling and reheating. *Applied Mathematical Modelling* 39(22):6830-6844. doi:10.1016/j.apm.2015.02.029.

- DiPippo R (2013). Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. Butterworth Heinemann, Waltham.
- Goodarzi M, Kiasat M, Khalilidehkordi E (2014). Performance analysis of a modified regenerative Brayton and inverse Brayton cycle. *Energy* 72:35-43. doi:10.1016/j.energy.2014.04.072.
- Javadi MA, Khalili Abhari M, Ghasemiasl R, Ghomashi H (2021). Energy, exergy and exergy-economic analysis of a new multigeneration system based on double-flash geothermal power plant and solar power tower. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47. doi:10.1016/j.seta.2021.101536.
- Laudon Matthew, Laird DL, Romanowicz BF, Clean Technology 2008 (2008: Boston, Mass.), NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show., & TechConnect Summit. (2008). *Clean Technology 2008: bio energy, renewables, green building, smart grid, storage, and water*. Clean Technology and Sustainable Industries Organization.
- Mossi Idrissa AK, Goni Boulama K (2019). Advanced exergy analysis of a combined Brayton/Brayton power cycle. *Energy* 166:724-737. doi:10.1016/j.energy.2018.10.117.
- Pambudi N, Itoi R, Jalilinasrabady S (2013). Performance evaluation of double-flash geothermal power plant at Dieng using second law of thermodynamics. In *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Parikhani T, Delpisheh M, Haghghi MA, Holagh SG, Athari H (2021). Performance enhancement and multi-objective optimization of a double-flash binary geothermal power plant. *Energy Nexus* 2:100012. doi:10.1016/j.nexus.2021.100012
- Paulillo A, Cotton L, Law R, Striolo A, Lettieri P (2020). Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project. *Journal of Cleaner Production* 249. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119410.
- Sachdeva J, Singh O (2019). Thermodynamic analysis of solar powered triple combined Brayton, Rankine and organic Rankine cycle for carbon free power. *Renewable Energy* 139:765-780. doi:10.1016/j.renene.2019.02.128.
- Santos JTD, Fagundes TM, Santos EDd, Isoldi LA, Rocha LAO (2017). Analysis of a combined brayton/rankine cycle with two regenerators in parallel. *Revista de Engenharia Térmica* 16(2):10-17. doi:10.5380/reterm.v16i2.62205.
- Shan S, Zhou Z, Cen K (2019). An innovative integrated system concept between oxy-fuel thermo-photovoltaic device and a Brayton-Rankine combined cycle and its preliminary thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management* 180:1139-1152. doi:10.1016/j.enconman.2018.11.040.
- Yari M (2010). Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy* 35(1):112-121. doi:10.1016/j.renene.2009.07.023.
- Živić M, Galović A, Virag Z (2014). Detailed analysis of the effect of the turbine and compressor isentropic efficiency on the thermal and exergy efficiency of a Brayton cycle. *Thermal Science* 18(3):843-852. doi:10.2298/TSCI1403843Z.
- Živić M, Galović A, Avsec J, Holik M (2016). Eksergijska analiza Braytonovog ciklusa s promjenjivim fizikalnim svojstvima i promjenjivim sastavom radne tvari. *Tehnicki Vjesnik* 23(3):801-808. doi:10.17559/TV-20160208112755.

## Addendum

### Nomenclatura

| Símbolos  |  |
|-----------|--|
| $C_p$     | Calor específico a presión constante (kJ/kg-K) |
| $g$       | Aceleración gravedad (m/s <sup>2</sup> )       |
| $h$       | Entalpía específica (kJ/kg)                    |
| $\dot{m}$ | Flujo másico (kg/s)                            |
| $\dot{Q}$ | Potencia calorífica (kW)                       |
| $T$       | Temperatura (°C, K)                            |
| $v$       | Velocidad (m/s)                                |
| $\dot{W}$ | Potencia (kW)                                  |
| $Z$       | Altura (m)                                     |

| Subíndices  |                         |
|-------------|-------------------------|
| 0           | Estado de referencia    |
| 1...14      | Estados                 |
| $c1, c2$    | Compresores 1 y 2       |
| $e$         | Entrada                 |
| $in$        | Intercambiador de calor |
| $out, s$    | Salidas                 |
| $t1$ y $t2$ | Turbinas 1 y 2          |

| Letras griegas |                |
|----------------|----------------|
| $\eta$         | Eficiencia (-) |



## El problema del diagnóstico de fallas: Análisis comparativo de observadores de estado de tipo Luenberger y Luenberger con modos deslizantes en un sistema de un cuarto de suspensión para un automóvil

The fault diagnosis problem: comparative analysis of Luenberger and Luenberger state observers with sliding modes in a quarter-suspension system for an automobile

Juan Anzures Marín\* , Salvador Ramírez Zavala

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Av. Francisco J. Mujica S/N, Morelia, Michoacán, México.

### Historial

Manuscrito recibido: 19 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 15 de julio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

### \*Autor para correspondencia

Juan Anzures Marín

[juan.anzures@umich.mx](mailto:juan.anzures@umich.mx)

ORCID: 0000-0002-6686-3277

### Resumen

El presente artículo muestra una metodología aplicada al problema del diagnóstico de fallas en sensores basada en un observador de Luenberger y el observador de Luenberger con modos deslizantes, aplicado en un sistema de un cuarto de suspensión en un automóvil. Esta metodología se basa en analizar señales conocidas como residuos o señales de fallas, las cuales indican una operación consistente o inconsistente del sistema; cuyo principio de funcionamiento es la comparación de la información de la salida medida del sistema con la información de la salida estimada a través del observador de estados, para ello se propone un umbral, con lo cual se toma la decisión respecto a una posible falla en el sistema. Las pruebas realizadas permiten establecer que el diseño de observadores de Luenberger y de Luenberger con modos deslizantes proporciona una herramienta útil para el problema del diagnóstico de fallas en sistemas donde se conoce el modelo.

**Palabras clave:** Observador de Luenberger, Observador de Luenberger con Modos Deslizantes, Diagnóstico de Fallas, Matlab.

### Introducción

Un observador de estado es un sistema dinámico que estima las variables de estado o parámetros a partir de mediciones disponibles. En la actualidad los observadores, también llamados sensores virtuales, son ampliamente utilizados debido a que permiten estimar variables difíciles de medir de un sistema a partir de algoritmos matemáticos y mediciones disponibles, además son adecuados para detectar y localizar fallas en actuadores y sensores. Los observadores tienen un procedimiento de diseño sistemático y sencillo, lo que

### Abstract

This paper shows the methodology based on a Luenberger observer and the sliding modes Luenberger observer, to address the fault diagnosis problem in sensors, applied in a  $\frac{1}{4}$  suspension in an automobile. This methodology is based on analyzing residual signals or fault signals, which indicate a consistent or inconsistent operation of the system; its operating principle is based on the comparison of the information of the measured output of the system with the information of the estimated output through the state observer. For this, a threshold is proposed, based on which a decision is made regarding a possible system failure. The tests carried out allow to establish that the design of Luenberger observers and Sliding modes Luenberger observer provides a useful tool for the fault diagnosis problem in systems where the model is known.

**Keywords:** Luenberger Observer, Sliding Modes Luenberger Observer, Fault Diagnosis, Matlab.

facilita su implementación y ejecución en tiempo real.

En la industria automotriz, el confort y la estabilidad son características esenciales para que el modelo de un vehículo cumpla con las especificaciones que demanda el mercado actual. El confort y la estabilidad garantizan las condiciones de comodidad y de seguridad, respectivamente. El sistema de suspensión es el encargado de aislar al chasis del movimiento causado por las irregularidades del terreno y, al mismo tiempo, asegura que las ruedas se mantengan en contacto con la carretera. La calidad de la actuación de la suspensión

no sólo afecta directamente al desempeño del manejo y la comodidad del viaje, sino también la seguridad en la conducción, la maniobrabilidad, la estabilidad y el ahorro de combustible.

El problema del diagnóstico de fallas ha sido estudiado ampliamente desde hace varias décadas, por lo cual podemos encontrar gran cantidad de trabajos relacionados al área, como los mostrados por Hedrick y Rajamani (1994), quienes hacen uso de observadores de estado para sistemas no lineales con el objeto de mejorar la calidad del viaje en una suspensión activa, y observadores de estado para sistemas bilineales para reducir la dinámica de la carga del neumático en una suspensión semi-activa de un vehículo pesado. Azadi y Soltani (2009) presentan un método basado en la transformada Wavelet continua para diagnosticar fallas en un amortiguador. El método analiza la frecuencia natural del sistema y los componentes de frecuencia de la señal con la energía máxima relativa.

Lozoya *et al.* (2012), proponen un sistema de detección de fallas para monitorear el rendimiento del amortiguador, para eso estiman la frecuencia para la carretera basado en la deflexión de la suspensión. Rizvi *et al.* (2013), utilizan el modelo de una suspensión activa del modelo completo del vehículo para diagnosticar fallas en los actuadores. Además, desarrollan un enfoque basado en observadores de entradas desconocidas (Unknown Input Observer) para desacoplar el sistema de las perturbaciones de la carretera y así el residuo generado tan sólo sea sensible a las fallas. Existen más trabajos que se pueden encontrar con enfoques basados en el modelo del sistema como los mostrados por Lin y Singh (2007), Minghu *et al.* (2009), y Weitiany Mehrdad (2006). Así, el estudio realizado en este trabajo para el diagnóstico de fallas se basa en la generación de residuos a través de la comparación entre la salida del sistema respecto a una salida estimada, esto es posible usando un modelo de la planta implementada con un observador de estados.

## Metodología

### Diagnóstico de fallas basado en observadores.

Los inicios del diagnóstico de fallas basados en el modelo surgen como una aplicación de la teoría de los observadores utilizados en el área de control automático. Aunque la automatización de los sistemas permite reducir la exposición de los operadores humanos al manejo manual, tareas repetitivas y ambientes inseguros, no garantiza la prevención de eventos de falla en los procesos.

La naturaleza física de los sistemas hace que éstos sean vulnerables a fallas en sus componentes, lo cual está asociado a efectos no deseados en los mismos, ya que se puede presentar desde la reducción del desempeño hasta la interrupción total de la actividad. Es importante mencionar que en ocasiones el inicio de una falla no se manifiesta de manera rotunda en el funcionamiento del sistema; sin embargo, la operación prolongada bajo esta situación provoca que la falla se intensifique y por lo tanto el efecto sobre el proceso sea mayor.

A partir de una secuencia de entradas y salidas obtenidas de los sensores en el proceso, el objetivo de la detección de fallas es verificar la consistencia con el comportamiento del modelo, de esta manera la detección de una inconsistencia es un indicativo de la presencia de una falla en el sistema. Una forma de verificar dicha consistencia entre el modelo y las mediciones entrada-salida ( $u(t), y(t)$ ) es generar una estimación de las salidas ( $\hat{y}(t)$ ). La consistencia entre el sistema real y el modelo se evalúa a cada instante de tiempo mediante la diferencia (1), conocida como residuo.

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (1)$$

Idealmente, en un sistema libre de fallas, el valor absoluto del residuo  $r(t)$  debe estar suficientemente cerca de cero y naturalmente desviarse de cero cuando una falla  $d(t)$  ocurre en el sistema; de esta forma, se usa esta propiedad del residuo para determinar si se presenta o no una falla en el sistema, es decir, se cumple la condición (2).

$$\begin{aligned} \text{si } |r(t)| \in \text{Zero} & \quad \text{no hay falla } (d(t) = 0) \\ \text{si } |r(t)| \in \text{No Zero} & \quad \text{hay falla } (d(t) \neq 0) \end{aligned} \quad (2)$$

Por lo tanto, se puede decir que los residuos son sensibles a fallas específicas. En este sentido una propiedad deseable es que el residuo sea insensible o poco sensible a variaciones paramétricas en una vecindad de valores nominales; es decir, las variaciones paramétricas no deben ser confundidas con fallas, los residuos deben ser robustos ante dichos efectos. Dicha robustez en la detección de fallas se puede lograr en la generación de residuos o en la fase de toma de decisión. De esta manera, la idea generalmente aceptada para el diagnóstico de fallas es que se puede dividir dos etapas básicas usando una estructura como se muestra en la **Figura 1**, y se describen a continuación:

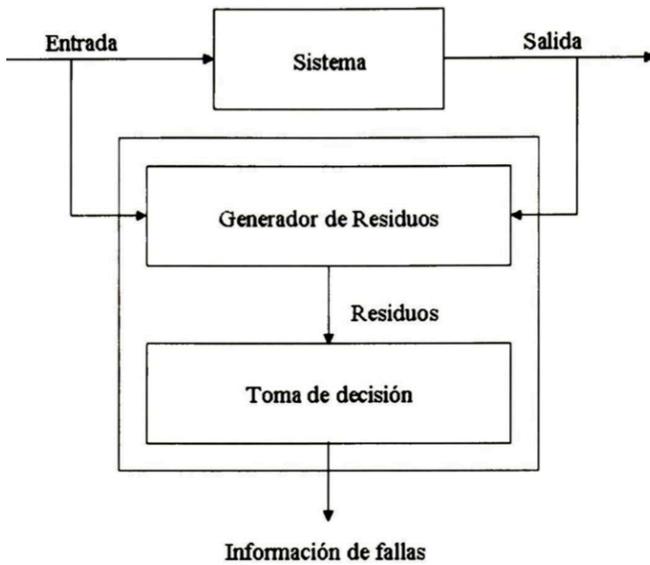


Figura 1. Estructura general del sistema de diagnóstico de fallas

*Generación de residuos.* Su propósito es generar la señal de diagnóstico conocida como residuo, la cual sólo depende de las fallas y no de la entrada.

*Toma de decisión.* El propósito de esta etapa, también conocida como evaluación de residuo, es examinar el residuo y extraer información sobre las fallas.

**Observador de Luenberger.**

Los observadores son llamados sensores virtuales debido a que su algoritmo de programación tiende a realizar la misma función que un sensor físico. Sin embargo, el diseño de un observador implica que el sistema sea observable (Cristina *et al.* 2013). La aproximación basada en observadores necesita de un modelo del sistema dado por (3) para operar de forma paralela con el proceso en

lazo abierto (Cristina *et al.* 2013), por lo cual se garantiza el conocimiento pleno del comportamiento del sistema. La diferencia entre la medición de salida y la señal estimada por el observador es diferente de cero cuando ocurre un error (Guillermo *et al.* 2012).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{3}$$

Si por restricciones físicas no tenemos acceso para medir a las variables del sistema, se pueden estimar, y para ello se recomienda construir un observador de estado, basado en mediciones de entradas y salidas, lo cual permitirá generar las señales de falla o residuos y con ello detectar fallas en el sistema. Como se puede apreciar de la **Figura 2**, de donde se puede obtener (4).

$$y(t) - \hat{y}(t) = Cx(t) - C\hat{x}(t) = C\tilde{x}(t) \tag{4}$$

La ecuación para el observador se muestra en (5) y (6).

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \tag{5}$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[Cx(t) - C\hat{x}(t)] \tag{6}$$

El objetivo del observador es hacer que el error de estado  $e(t)$  en (7) tienda a cero conforme  $t$  tiende a infinito, para lo cual es importante conocer la dinámica del error, desarrollada en (8).

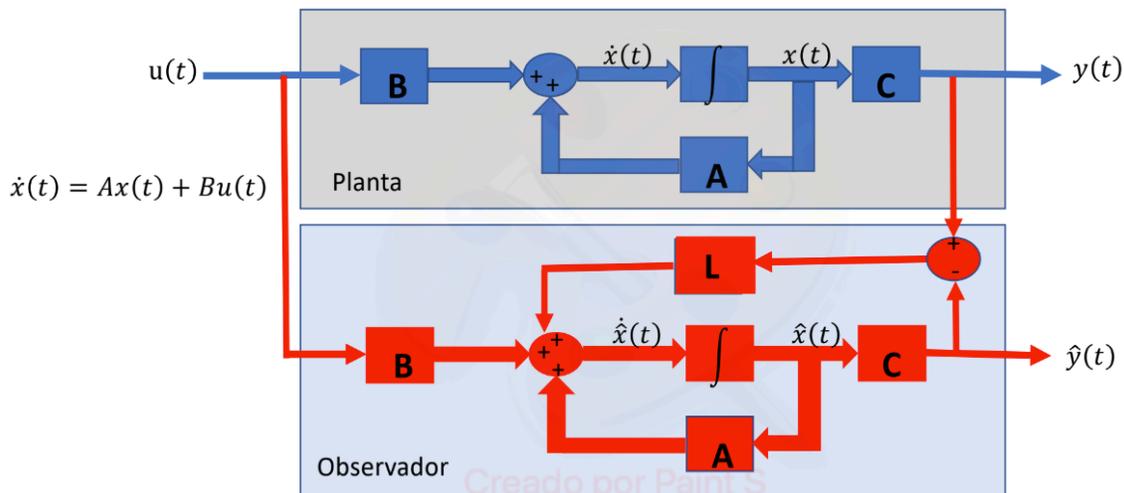


Figura 2. Estructura de un observador de estado acoplado a la planta o sistema.

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (7)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t)$$

$$\dot{e}(t) = Ax(t) + Bu(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t) - L[Cx(t) - C\hat{x}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = A[x(t) - \hat{x}(t)] - LC[x(t) - \hat{x}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (8)$$

Es fácil notar que:

$$e(t) \rightarrow 0. \quad \text{conforme} \quad t \rightarrow \infty$$

Si la matriz del error en lazo cerrado  $(A - LC)$  es Hurwitz; es decir que sus valores propios tengan la parte real negativa y por lo tanto se podrán asignar polos  $\alpha(S)$ , de la siguiente manera:

$$\det(SI - A + LC) = \alpha(S) = S^n + \alpha_1 S^{n-1} + \dots + \alpha_n$$

si y sólo si, el sistema es observable. La matriz de ganancias  $L$  se puede obtener como en (9).

$$L = \alpha(A)O^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde  $\alpha(A)$  es el polinomio propuesto evaluado en la matriz de estados  $A$  y  $O^{-1}$ , es la inversa de la matriz de observabilidad.

Por otro lado, la estabilidad y las características de respuesta transitoria se determina mediante los valores característicos de la matriz  $(A-LC)$ . Si se elige la matriz  $L$  en forma adecuada, la matriz  $(A-LC)$  se convierte en una matriz asintóticamente estable y para todo  $e(t) \neq 0$  es posible hacer que  $\dot{e}(t)$  tienda a 0 conforme  $t$  tienda a infinito (Luenberger, 1971).

El diseño del observador a través de la retroalimentación de estados observados se basa en la asignación de polos haciendo uso de (9) para encontrar la matriz de ganancias  $L$  mediante un análisis previo de observabilidad del sistema, recordando que dicha técnica se basa en la dinámica del sistema.

### Observador de Luenberger con modos deslizantes

Sea el Observador de Luenberger definido en (6) al agregar un término discontinuo de modos deslizantes queda representado por (10) (Anzures-Marin y Castillo-Toledo, 2006).

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] + \varphi(t) \quad (10)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t)$$

donde,  $\varphi(t)$  es el vector discontinuo de modos deslizantes definido por (11).

$$\varphi(t) = M_o \text{sign}(e(t)^T P) \quad (11)$$

Donde  $\text{sign}(\cdot)$  representa la función signo cuya definición se muestra a continuación:

$$\text{sign}(e(t)^T P) = \frac{e(t)^T P}{\|e(t)^T P\|}$$

Para el análisis de la convergencia, el error de estimación de (7) y su dinámica quedaría como en (13).

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= Ax(t) + Bu(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t) \\ &\quad - L[Cx(t) - C\hat{x}(t)] - \varphi(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= A[x(t) - \hat{x}(t)] \\ &\quad - LC[x(t) - \hat{x}(t)] - \varphi(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) - M_o \text{sign}(e(t)^T P) \quad (13)$$

De esta manera, el análisis de estabilidad de  $\dot{e}(t)$  descrito en (13), debe cumplir que  $M_0 > 0$  sea una constante positiva y que  $P > 0$ , definida positiva satisfaga la ecuación de Lyapunov (14) (Kailath, 1980). Es decir, para una  $Q > 0$  definida positiva dada, encontrar una  $P > 0$  y simétrica que satisfaga (14).

$$A^T P + PA = -Q \quad (14)$$

### Modelado del sistema de un cuarto de suspensión de un automóvil

El caso de estudio que se desarrolla en el presente trabajo es un sistema de suspensión de un cuarto de un automóvil, el sistema de suspensión proporciona características de buen desempeño y confort en la conduc-

ción. La principal aplicación del sistema es controlar el movimiento vertical excesivo de la rueda para eliminar las fallas de contacto entre el neumático y la carretera, mantener buenas características de conducción y evitar daños a la suspensión.

El modelo de un cuarto de automóvil (Hrovat, 1990), el cual representa adecuadamente el problema del control de las variaciones de carga sobre las ruedas del vehículo y las fuerzas que intervienen en el sistema de suspensión, como se muestra en la **Figura 3**, donde los resortes tienen fuerzas iniciales en posición de equilibrio dadas por (15).

$$F_u = (m_s + m_u)g$$

$$F_s = (m_s)g \tag{15}$$

Donde  $g$  representa la aceleración de la gravedad.

Aplicando la segunda ley de Newton, a la masa suspendida (chasis) y no suspendida (neumático) se obtiene (16) y (17).

$$m_s \ddot{x}_s = F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - (-F_s + k_s (x_s - x_u)) - m_s g \tag{16}$$

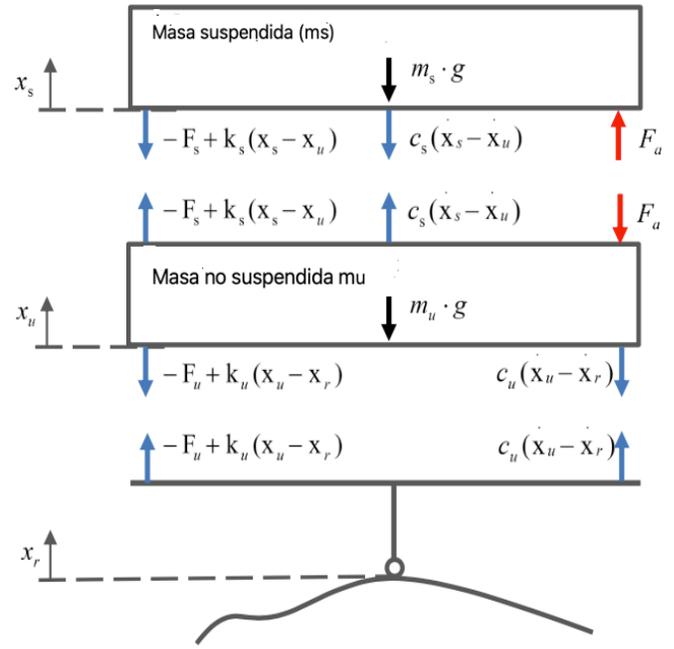
$$m_u \ddot{x}_u = -F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + (-F_s + k_s (x_s - x_u)) - m_u g - c_u (\dot{x}_u - \dot{x}_r) - (-F_u + k_u (x_u - x_r)) \tag{17}$$

Simplificando las ecuaciones (16) y (17) y, considerando (15) se obtiene (18) y (19).

$$m_s \ddot{x}_s = F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - (k_s (x_s - x_u)) \tag{18}$$

$$m_u \ddot{x}_u = -F_a + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + (k_s (x_s - x_u)) - c_u (\dot{x}_u - \dot{x}_r) - (k_u (x_u - x_r)) \tag{19}$$

Donde:  $x_r$  es el desplazamiento por las irregularidades del camino en metros (m);  $x_u$  es el desplazamiento vertical del neumático en metros (m);  $x_s$  es el desplazamiento vertical del chasis en metros (m);  $F_a$  es la fuerza del actuador en Newton (N);  $F_u$  y  $F_s$  son las fuerzas iniciales de los resortes en Newton(N).



**Figura 3.** Esquema de un modelo de un cuarto de vehículo.

De esta manera, (18) y (19) representan el modelo de la masa suspendida y de la masa no suspendida, respectivamente. Estas ecuaciones describen el comportamiento de dichas masas cuando se analiza la cuarta parte de un vehículo.

Para determinar el sistema de ecuaciones de estado, primero se define:

| Variables de estado  | Entradas   | Salidas   |
|--|--|---|
| $x = \begin{bmatrix} x_s - x_u \\ \dot{x}_s \\ x_u - x_r \\ \dot{x}_u \end{bmatrix}$ | $u = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ F_a \end{bmatrix}$ | $y = \begin{bmatrix} x_s - x_u \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix}$ |

Donde cada término:  $(x_s - x_u)$  es la deflexión de la suspensión;  $\dot{x}_s$  es la velocidad vertical del chasis;  $(x_u - x_r)$  es la deflexión del neumático;  $\dot{x}_r$  es la velocidad vertical del camino;  $\dot{x}_u$  es la velocidad vertical del neumático y  $\ddot{x}_s$  es la aceleración vertical del chasis.

Así el modelo en espacio de estado que representa la dinámica del sistema se puede escribir como (3) donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_u}{m_u} & -\frac{c_u + c_s}{m_u} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_s} \\ -1 & 0 \\ \frac{c_u}{m_u} & -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_s} \end{bmatrix}$$

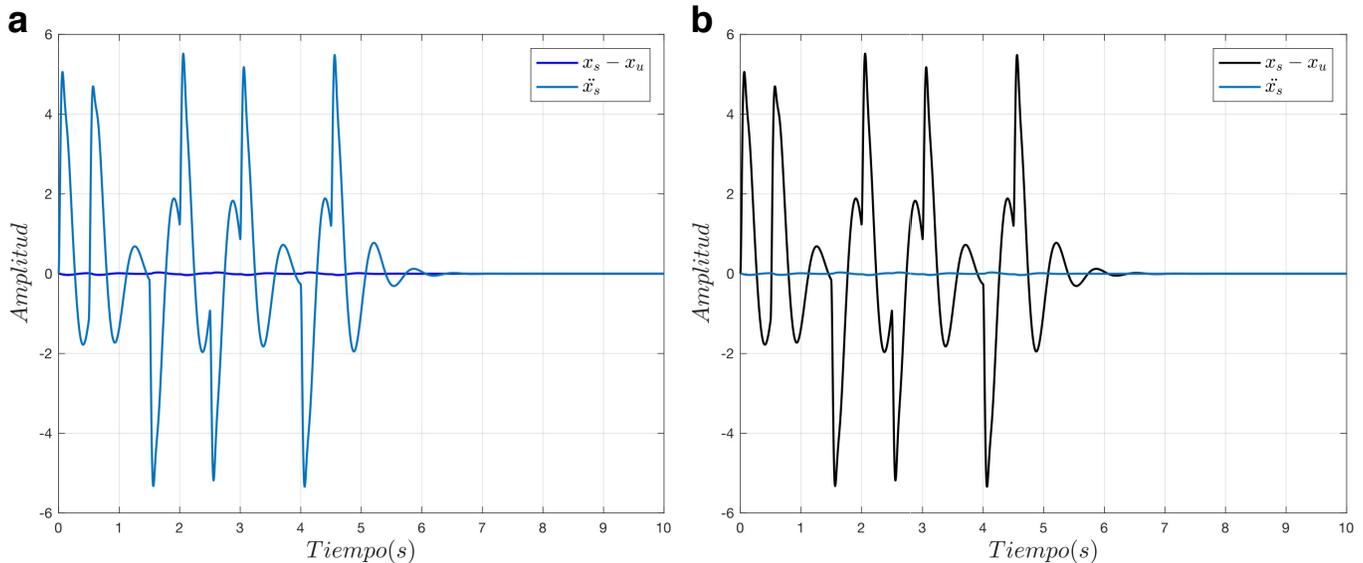
## Resultados

Primeramente, se comprueba que el sistema sea observable y que el observador de Luenberger diseñado proporcione el mismo comportamiento que el modelo matemático del sistema del amortiguador del automóvil, a una entrada aleatoria pulsante que simula las irregularidades del suelo; esta respuesta se puede ver en la **Figura 4**.

Después de comprobar la efectividad de los observadores diseñados, se realiza el diagrama para el diagnóstico de fallas dado por la **Figura 5**, donde el bloque llamado observador se reemplaza para la prueba de ambos observadores diseñados (Luenberger y Luenberger con modos deslizantes) y obteniéndose los residuos de acuerdo a (1); primero se establece un umbral para la señal del residuo, el tiempo de simulación fue de 30s en cuatro escenarios, los escenarios son:

1. *Sistema libre de fallas*: El comportamiento de los residuos cuando el sistema se encuentra libre de fallas se muestra en la **Figura 6**, para ambos observadores. Se observa que no hay presencia de residuos, como se esperaba, lo que indica la ausencia de falla en el sistema en ambos casos de los observadores diseñados.

2. *Sistema con fallas*: La segunda prueba consiste en agregar una falla abrupta mediante una entrada externa de tipo ruido en el sensor 2 en el segundo 10. En la **Figura 7** se puede apreciar que el residuo sobrepasa el umbral permitido por lo que la falla que aparece es provocada por el sensor 2. El residuo en el sensor 1 se puede observar en la figura 7, aunque se aprecia un valor



**Figura 4.** Salida real y estimada del sistema ante una entrada  $u(t)$ . **a)** Salida real del sistema, **b)** Salida estimada del sistema.

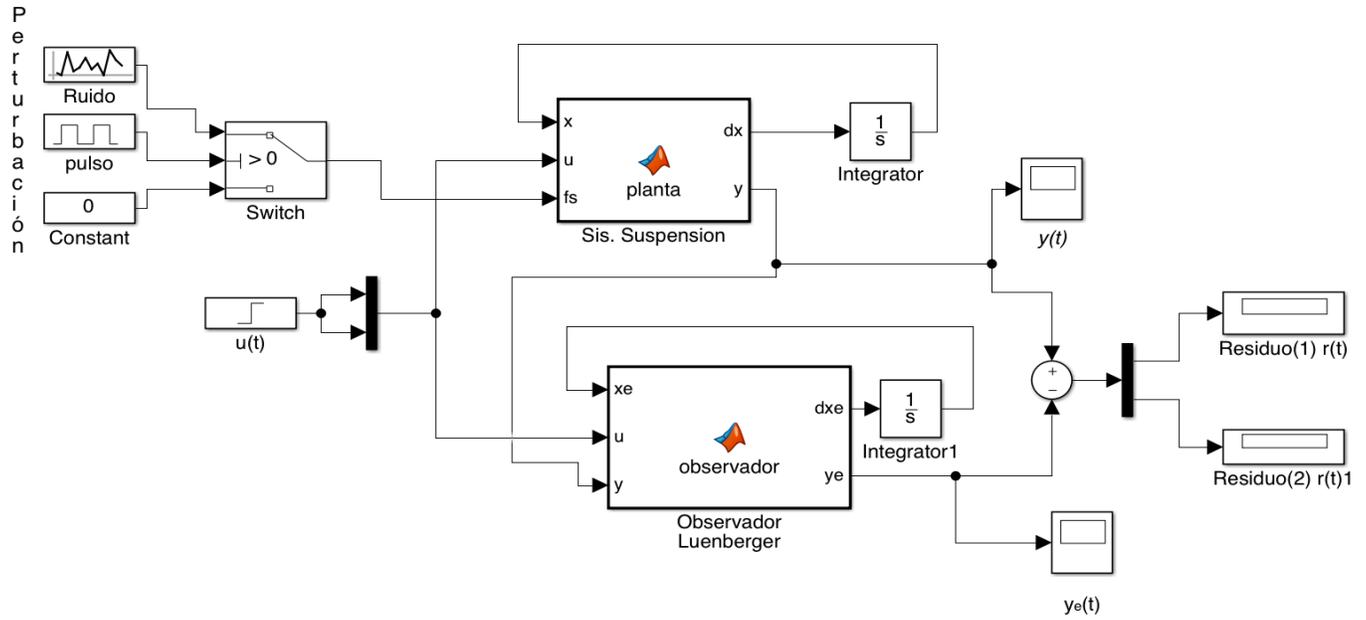


Figura 5. Esquema completo del observador de Luenberger

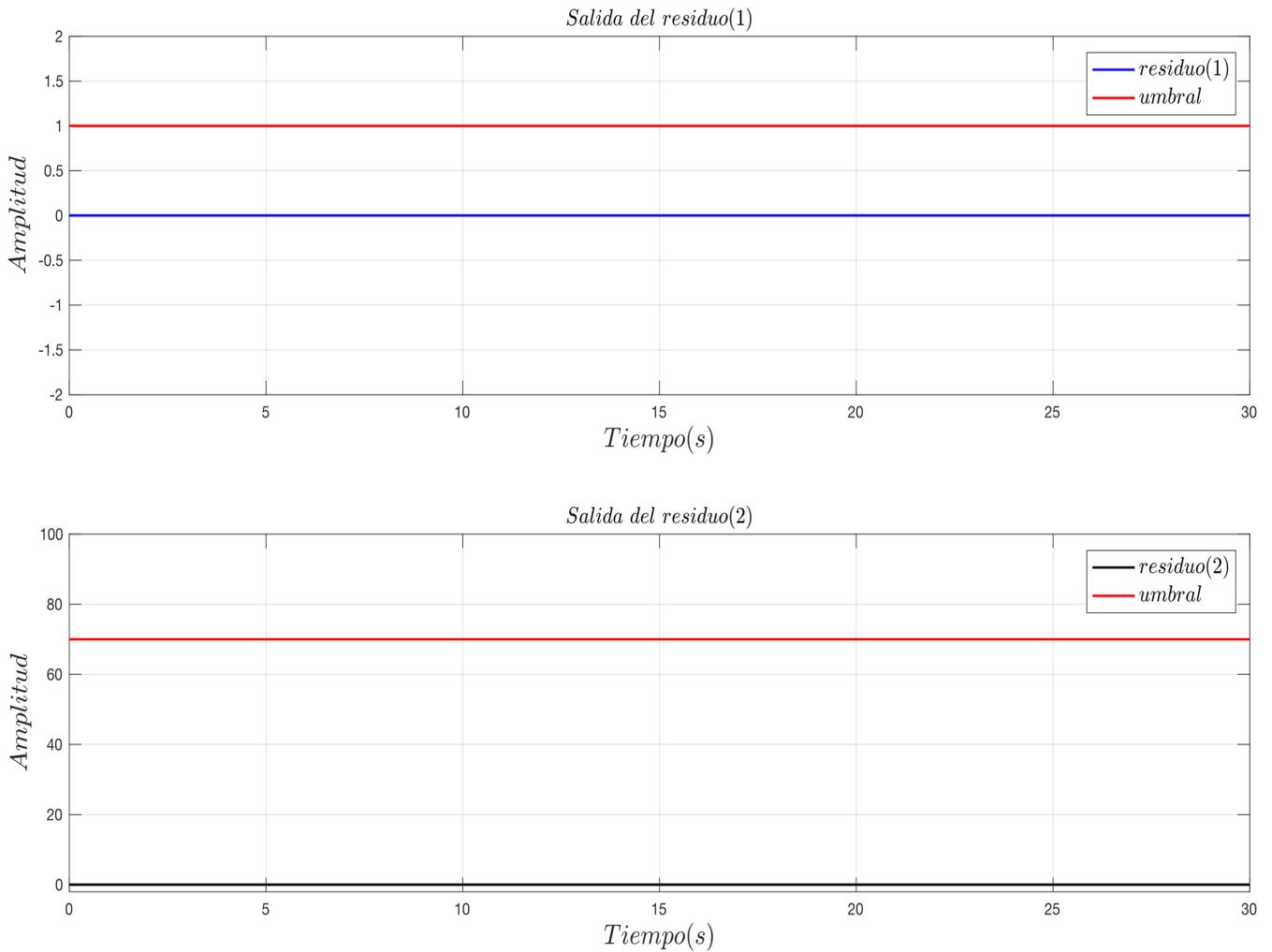


Figura 6. Comportamiento del residuo para un sistema libre de fallas

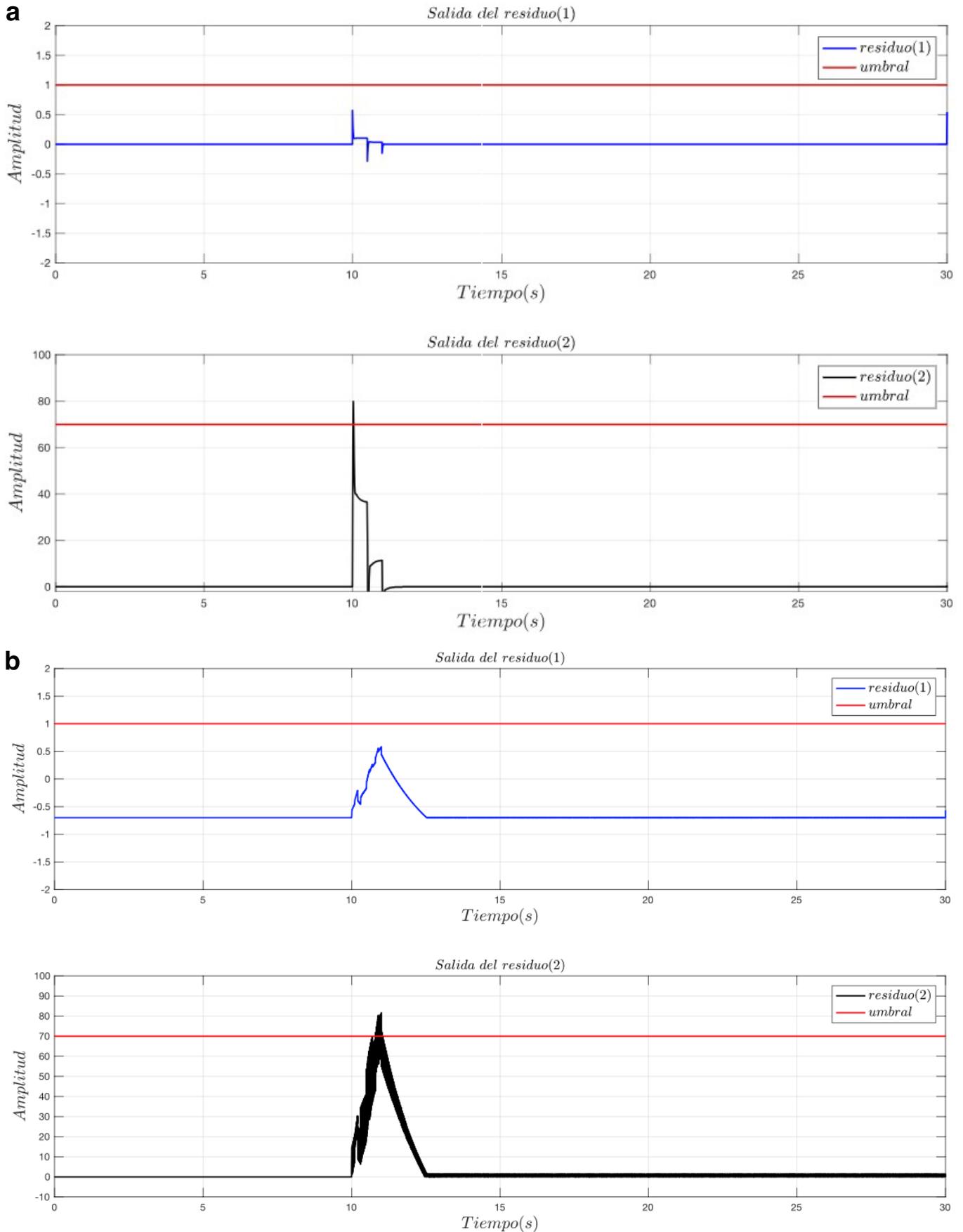


Figura 7. Comportamiento del residuo 1 y 2 ante una falla a) Observador de Luenberger b) Observadores con Modos Deslizantes

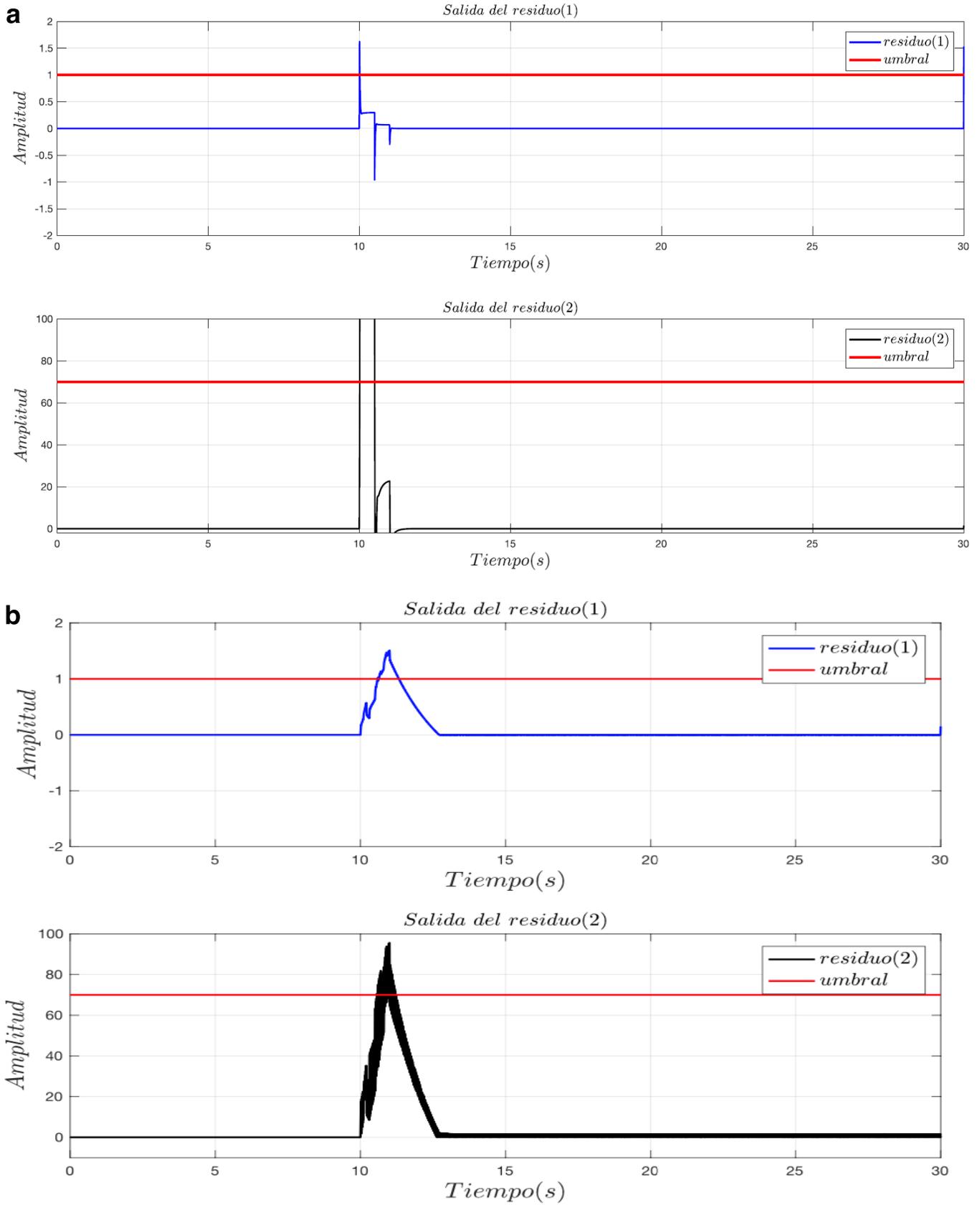


Figura 8. Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia de dos fallas a) Observador de Luenberger b) Observadores con Modos Deslizantes

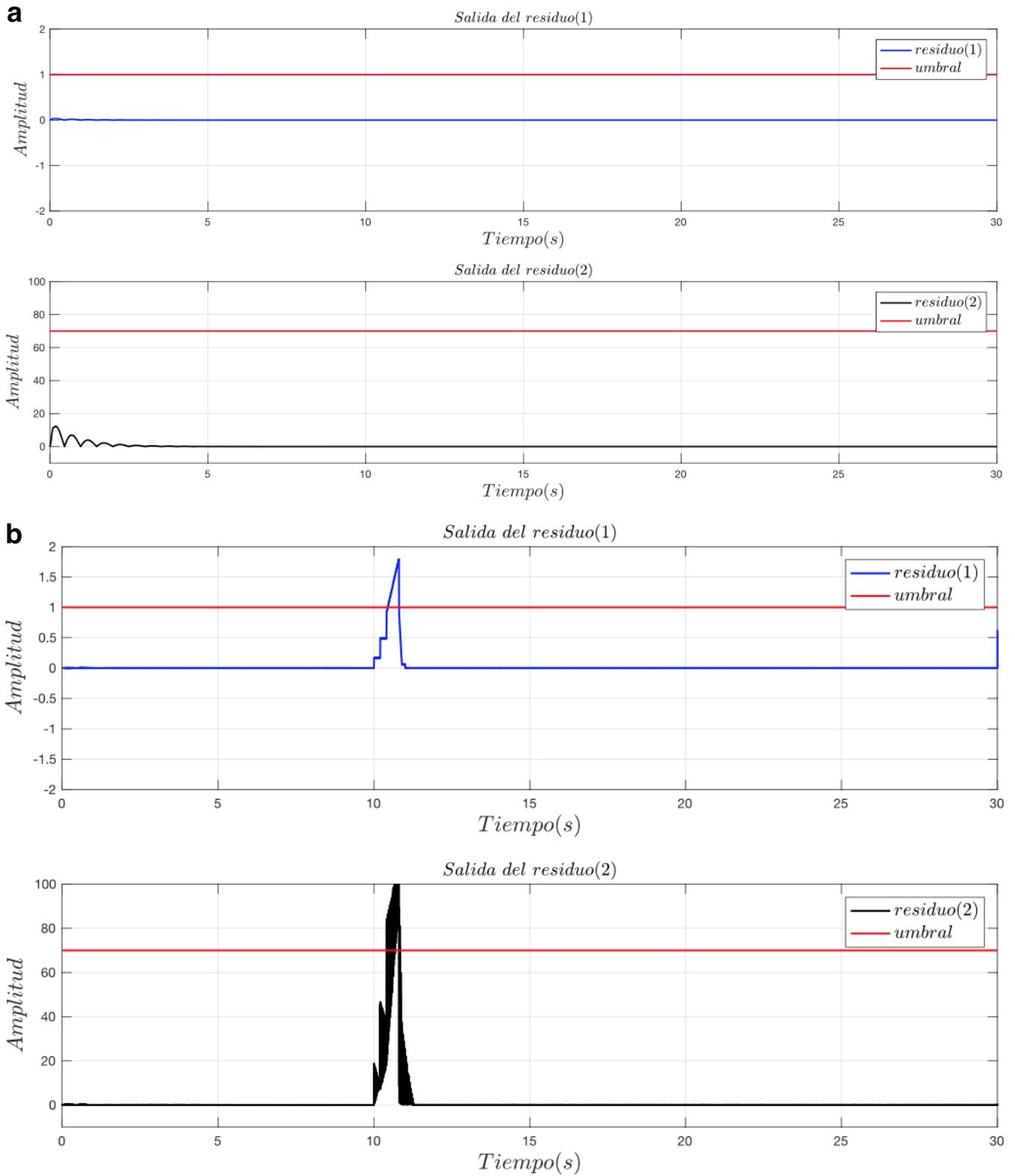


Figura 9. Comportamiento de residuo ante un cambio en los parámetros a) Observador de Luenberger b) Observador de Modos Deslizantes.

diferente de cero no sobrepasar el umbral permitido en ambos observadores diseñados.

3. La prueba tres, consiste en provocar dos fallas de manera simultánea; es decir, la medición de los sensores presenta errores en la lectura, al igual que las simulaciones anteriores se observa el comportamiento de residuo, a partir del segundo 10. En la **Figura 8** se presenta la comparación de los residuos con el umbral permitido en ambos observadores diseñados.

4. El cuarto escenario de prueba consiste en la modificación de los parámetros de la planta mediante el cambio de los valores del modelo de la planta (matrices A y B). En la figura 9 se muestra el comportamiento de los residuos del sistema como resultado de esta prueba. Se observa que los residuos tienen pequeños cambios, en el comportamiento del Observador con Modos Deslizantes desde este punto de vista es robusto ante una variación en los parámetros a diferencia que un Observador de Luenberger que afectan el cambio de los parámetros.

## Conclusiones

Se realizó un análisis sobre el diseño de diferentes observadores, como son: el Observador de Luenberger y Luenberger con modos deslizantes, para estudiar su eficiencia en el diagnóstico de fallas aplicado a un sistema conformado por resortes y amortiguadores los cuales son los encargados de absorber las vibraciones generadas por las irregularidades del terreno o vía, mientras mantiene los neumáticos siempre en contacto con la superficie lo que garantiza la seguridad del usuario. Así, los esquemas implementados para la detección de fallas o perturbaciones en las mediciones obtenidas por los sensores con los observadores cumplen con las condiciones deseadas cuyo objetivo es realizar el diagnóstico de fallas.

De las gráficas de respuesta se puede observar que la falla en los sensores es detectada directamente por el sensor afectado, como se muestra numéricamente en la **Tabla 1** y **Tabla 2**, donde se describen los valores pico de los residuos que sobrepasan los umbrales definidos, para una falla y fallas simultáneas respectivamente. El esquema basado en observadores propuesto presenta ventajas al momento de analizar las fallas en el sistema, puesto que tendrá el valor exacto de la misma. También se demostró que al variar los parámetros de la planta el observador de Luenberger con modos deslizantes muestra una respuesta robusta a diferencia del observador de Luenberger clásico en el proceso de detección de fallas, puesto que el residuo es insensible a la variación

de parámetros de la planta y al mismo tiempo sensibles a las fallas, como se muestra numéricamente en la **Tabla 3**. En base al desarrollo de este trabajo, se puede mencionar que el problema del diagnóstico de fallas aún está abierto, la técnica o herramienta a utilizar para la solución depende de la naturaleza del sistema.

Con base en los resultados obtenidos, los autores del presente trabajo realizan la siguiente discusión técnica: El observador con modos deslizantes mostró mejor desempeño ante variación de parámetros, manteniendo menor error de estimación y generando residuos más sensibles a fallas, evitando falso positivos, lo cual puede ser crítico en aplicaciones sensibles. Aunque el observador con modos deslizantes requiere una mayor capacidad de cómputo, su implementación sigue siendo factible en plataformas embebidas típicas del dominio automotriz. Este enfoque representa una alternativa sólida y clara frente a técnicas más complejas como el diagnóstico basado en aprendizaje automático, especialmente en escenarios con disponibilidad limitada de datos históricos.

**Tabla 1.** Comparativa de residuos numéricos con una falla

| Observador                       | Residuo 1 (th=1) | Residuos 2 (th=70) |
|----------------------------------|------------------|--------------------|
| Luenberger                       | 0.7              | 80                 |
| Luenberger con modos deslizantes | 0.6              | 84                 |

**Tabla 2.** Comparativa de residuos numéricos con dos fallas

| Observador                       | Residuo 1 (th=1) | Residuos 2 (th=70) |
|----------------------------------|------------------|--------------------|
| Luenberger                       | 1.75             | 100                |
| Luenberger con modos deslizantes | 0.62             | 82                 |

**Tabla 3.** Comparativa de residuos numéricos con variación de parámetros

| Observador                       | Residuo 1 (th=1)  | Residuos 2 (th=70) |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|
| Luenberger                       | 1.80              | 100                |
| Luenberger con modos deslizantes | No pasa el umbral | No pasa el umbral  |

## Referencias

Anzures-Marín J, Castillo-Toledo B (2006). The fault diagnosis problem: sliding mode fuzzy dedicated observers approach. In: 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 16-21 July 2006. pp 1322-1328. doi:10.1109/FUZZY.2006.1681881

Azadi S, Soltani A (2009). Fault detection of vehicle suspension

system using wavelet analysis. *Vehicle System Dynamics* 47(4):403-418. doi:10.1080/00423110802094298

Cristina V, Gentil S, Morales-Méndez R (2013). Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos. México D.F.: Trillas.

Guillermo R, Bocero HD (2012). Turbinas eólicas: Optimización en el pre-diagnóstico de fallas en el generador. *Información Tecnológica* 23(1):153-162

Hedrick JK, Rajamani R, Yi K (1994) Observer Design for Electronic Suspension Applications\*. *Vehicle System Dynamics* 23(1):413-440. doi:10.1080/00423119408969068

Hrovat D (1990). Optimal active suspension structure for quarter-car vehicle models. *Automata* 5(25):845-860.

Kailath T (1980). Linear systems (Vol. 1) Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall

Lozoya-Santos J, Tudon-Martínez JC, Morales-Menendez R, Ramírez-Mendoza R, Molina Gutierrez A (2012) Fault Detection for an Automotive MR Damper. *IFAC Proceedings Volumes* 45(6):1023-1028. doi:10.3182/20120523-3-RO-2023.00247

Lin PP, Singh H (2007). *Intelligent model-free diagnosis for multiple faults in a nonlinear dynamic system*. In: 2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, 4-7 Sept. 2007. pp 1-6. doi:10.1109/AIM.2007.4412526

Luenberger D (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control* 16(6):596-602. doi:10.1109/TAC.1971.1099826

Minghu Z, Dehu W, Shijun L, Yuxi S, Hong L, Shaojie C (2009). Application on Virtual Instrument and Neural Networks in the Fault Diagnosis. In: 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 10-11 Oct. 2009. pp 317-320. doi:10.1109/ICICTA.2009.312

Rizvi SMH, Abid M, Qayyum Khan A (2013). Actuator fault diagnosis and isolation in vehicle active suspension system. In: 2013 IEEE 9th International Conference on Emerging Technologies (ICET), 9-10 Dec. 2013 2013. pp 1-6. doi:10.1109/ICET.2013.6743503

Weitian C, Saif M (2006). Fault detection and isolation based on novel unknown input observer design. In: 2006 American Control Conference, 14-16 June 2006 2006. p 6. doi:10.1109/ACC.2006.1657536



# Gobernanza municipal en cogestión para el desarrollo sustentable: un estudio de caso en Michoacán, México

Municipal governance in co-management for sustainable development: a case study in Michoacán, Mexico

Mateo Alfredo Castillo Ceja<sup>1</sup> , Dante Ariel Ayala Ortiz<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Facultad de Economía “Vasco de Quiroga”, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## Historial

Manuscrito recibido: 22 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 10 de junio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Dante Ariel Ayala Ortiz

dante.ayala@umich.mx

ORCID: 0000-0002-7331-3628

## Resumen

En este trabajo se explora la implementación de estrategias de cogestión y gobernanza municipal en el contexto del desarrollo sustentable, utilizando como estudio de caso a 20 municipios del estado de Michoacán, México. Se analizan los principales desafíos que enfrentan los municipios para transversalizar la sustentabilidad como política pública e integrar la visión de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en sus planes municipales de desarrollo (PMD). A través de una metodología cualitativa, se identifican las barreras estructurales, normativas y de participación ciudadana que limitan la adopción efectiva de estas políticas y se propone un marco participativo para evaluar y fortalecer la gobernanza local, destacando la creación de Comités Ciudadanos para la Evaluación de la Sustentabilidad Municipal (CCESuM). Los resultados subrayan la importancia de establecer una base normativa sólida, un marco ético de actuación basado en principios y valores, y la transversalización de la Agenda 2030 en la planificación local para alcanzar un desarrollo sustentable inclusivo y efectivo. En este trabajo se enfatiza la necesidad de un procedimiento de cogestión que empodere a la ciudadanía y refuerce la gobernanza municipal en torno a la sustentabilidad.

**Palabras clave:** sustentabilidad, empoderamiento, cogestión, gobernanza, participación ciudadana, evaluación participativa.

## Introducción

El Desarrollo Sustentable (DS) se ha establecido como un enfoque global imprescindible para abordar los desafíos económicos, sociales, culturales, políticos y ambientales del siglo XXI. A nivel local y municipal, la implementación del DS presenta múltiples desafíos debido

## Abstract

This paper explores the implementation of co-management strategies and municipal governance in the context of sustainable development, using 20 municipalities from the state of Michoacán, Mexico, as a case study. It analyzes the main challenges that municipalities face in mainstreaming sustainability as a public policy and integrating the vision of the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs) into their municipal development plans (MDPs). Through a qualitative methodology, it identifies the structural, regulatory, and citizen participation barriers that limit the effective adoption of these policies and proposes a participatory framework to evaluate and strengthen local governance, highlighting the creation of Citizen Committees for the Evaluation of Municipal Sustainability (CCESuM). The results emphasize the importance of establishing a solid normative foundation, an ethical framework of action based on principles and values, and the mainstreaming of the 2030 Agenda in local planning to achieve inclusive and effective sustainable development. This work emphasizes the need for a co-management procedure that empowers citizens and reinforces municipal governance around sustainability.

**Keywords:** sustainability, empowerment, co-management, governance, citizen participation, participatory evaluation.

a la necesidad de transversalizarlo en las políticas, planes y programas que buscan mejorar las condiciones de vida de la población local (Castillo, 2022). La complejidad de este proceso radica en la multiplicidad de variables y dimensiones que deben ser consideradas, incluyendo obstáculos de carácter social, político, administrativo y

financiero, así como una articulación insuficiente con instituciones locales, nacionales e internacionales que promueven la sustentabilidad (Lara Salazar, 2013). Pese a los avances normativos y éticos en materia de sustentabilidad, los municipios aún enfrentan obstáculos persistentes para integrar estos principios en su planeación local, la ausencia de mecanismos eficaces de evaluación participativa constituye una brecha que esta investigación busca atender.

Michoacán resulta representativo por su diversidad territorial, sus desafíos socioambientales y la todavía incipiente adopción de estrategias de sustentabilidad a nivel municipal. Su estudio permite observar tanto los retos estructurales como las oportunidades emergentes en la transición hacia modelos de gobernanza sustentable.

La cogestión, entendida como la participación activa de una pluralidad de sujetos en la realización de actividades que generan resultados positivos en el ámbito municipal, se perfila como una estrategia clave para superar estos desafíos. Este enfoque promueve la cooperación organizada de los ciudadanos junto con el gobierno local en el diseño, ejecución, evaluación y control de proyectos que buscan el bienestar colectivo (Lara Salazar, 2013). Sin embargo, para que la cogestión sea efectiva, es fundamental empoderar a la ciudadanía, proporcionando las herramientas necesarias para participar activamente en la gobernanza y en la evaluación de la sustentabilidad municipal.

Los gobiernos locales operan bajo ciclos administrativos limitados, pero la sociedad civil tiene la capacidad de continuar y dar seguimiento a los proyectos que realmente inciden en la transformación de los estilos de vida hacia un desarrollo más sustentable. Es por ello que se necesita fomentar un empoderamiento ciudadano continuo, acompañado de la generación de información accesible para la ciudadanía, que permita evaluar y reconocer el avance hacia el DS de manera participativa y deliberativa (Castillo, 2022).

El objetivo principal de esta investigación ha sido diseñar un mecanismo de evaluación participativa de la sustentabilidad municipal que permita empoderar a la ciudadanía y fortalecer la gobernanza local en favor de la sustentabilidad desde el contexto de la Agenda 2030 (2015) y la Carta de la Tierra (2000), mediante la identificación de barreras estructurales, normativas y de participación, promoviendo la integración de principios éticos y de cogestión en los Planes Municipales de Desarrollo de municipios representativos del estado de Michoacán.

Como parte sustantiva de este objetivo se dan respuesta a algunas preguntas de investigación centrales

referentes a los obstáculos que impiden transversalizar la sustentabilidad en las políticas municipales y cómo puede diseñarse un proceso de evaluación que sea participativo, inclusivo y empoderador para la ciudadanía.

A partir de lo anterior, el trabajo ha consistido en: (i) el diseño de un instrumento participativo e incluyente que permite a los municipios identificar sus necesidades, potencialidades y problemáticas en las dimensiones social, económica, cultural y ambiental, con la participación protagónica de la sociedad civil; (ii) la identificación de aprendizajes conceptuales que, a partir de conocer cómo han evolucionado los conceptos de Sustentabilidad y Desarrollo Sustentable, nos permite adaptarlos a las necesidades locales y mejorar la comprensión de estos conceptos como base para la formulación de políticas públicas; (iii) realizar un análisis de congruencia del marco legal internacional, nacional y estatal que respalde la sustentabilidad como política municipal, fundamentado en el artículo 25 de la Constitución Mexicana, que establece el derecho a un desarrollo integral y sustentable; (iv) identificar los elementos clave que fortalezcan el ciclo de políticas públicas en favor de la sustentabilidad municipal, con un enfoque en derechos humanos, inclusión y empoderamiento ciudadano, y finalmente; (v) la evaluación de capacidades municipales en cuanto a las condiciones de infraestructura, recursos y capacidades en 20 municipios de Michoacán para la implementación del DS en sus Planes Municipales de Desarrollo (PMD).

Este estudio responde a la falta de mecanismos y capacidades que permitan verificar, desde la ciudadanía, el avance hacia el DS en el ámbito municipal. Este trabajo busca contribuir a superar las inconsistencias en la implementación de la sustentabilidad como política pública en los municipios, fortaleciendo el vínculo entre gobierno y sociedad, y empoderando a la ciudadanía para participar activamente en la gobernanza local. Ante este escenario, se considera que la gobernanza municipal se fortalecerá mediante la evaluación participativa de la sustentabilidad, un proceso que facilitará un aprendizaje continuo tanto para el gobierno como para la sociedad civil. Este proceso, a su vez, impulsará la sustentabilidad del desarrollo municipal a través de una cogestión efectiva entre el gobierno local y la ciudadanía (Castillo, 2022).

La estructura de este artículo se organiza en cinco apartados, cada uno de los cuales se interrelaciona para proporcionar una comprensión integral de los conceptos y estrategias necesarias para alcanzar un Desarrollo Municipal Sustentable. Desde la revisión de experiencias locales hasta la presentación de resultados empíricos y propuestas de evaluación participativa, el artículo ofrece

un marco completo para la cogestión y la gobernanza en el contexto de la sustentabilidad municipal.

## Revisión de la literatura

El concepto de desarrollo sustentable ha evolucionado significativamente desde su popularización en el informe de la Comisión Brundtland en 1987, el cual definió como aquel que «satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades» (Brundtland, 1987). Desde entonces, se ha convertido en un eje central de la planificación y las políticas públicas a nivel global, incluyendo su integración en la Agenda 2030 y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promovidos por las Naciones Unidas (ONU, 2015).

## Evolución del concepto de sustentabilidad

Originalmente de corte antropocéntrico, la definición de desarrollo sustentable destacó la necesidad de equilibrio entre las dimensiones económica, social y ambiental principalmente. Sin embargo, autores latinoamericanos como Leonardo Boff, Enrique Leff, Victor Toledo y Cristian Luiz Da Silva, la visión de la Carta de la Tierra (2000) y las mismas reflexiones en seno de las cumbres de desarrollo sustentable del 2002 y 2012 han enriquecido este concepto al incorporar dimensiones culturales, políticas y espirituales. Según el Consorcio Mexicano de Instituciones de Educación Superior para la Sustentabilidad (COMPLEXUS, 2000), “La sustentabilidad puede ser definida como un proceso, en permanente construcción y adaptación, que exige la atención paralela de las dimensiones ecológica, político-social y espiritual, para generar condiciones propicias que permitan a los seres vivos satisfacer sus necesidades integrales y a las sociedades humanas, además, impulsar la justicia social y equidad económica. Ello implica, entre otros factores, la edificación de una ética ambiental, una nueva racionalidad económica, conocimientos interdisciplinarios, diálogo de saberes en el marco de la diversidad cultural y democracia, y el compromiso de heredar a las futuras generaciones condiciones favorables para la satisfacción de sus necesidades”. Esta definición ampliada plantea una transformación profunda y precisa de una armonización de los sistemas sociales, ambientales, políticos, económicos, culturales y espirituales mediante un enfoque complejo, sistémico, holístico y crítico.

## Gobernanza y participación ciudadana en la sostenibilidad

La gobernanza se ha convertido en un eje clave para la

implementar la sustentabilidad a nivel local. Este concepto hace referencia a un proceso colaborativo de toma de decisiones que integran a actores gubernamentales y no gubernamentales, y promueve esquemas horizontales, inclusivos y transparentes (Peters y Pierre, 2001). La participación ciudadana, dentro de este marco, se entiende como una práctica activa y propositiva que permite a la sociedad civil incidir en todas las fases del ciclo de políticas públicas.

Modelos como la “escalera de participación” de Arnstein (1969) y los espacios de participación deliberativa propuestos por Fung (2006) han sido fundamentales para identificar las formas simbólicas y efectivas de participación. En particular, la cogestión se plantea como una herramienta operativa de la gobernanza sustentable, pues permite la colaboración entre autoridades y ciudadanía en la identificación de problemas, diseño de políticas, implementación de acciones y evaluación de resultados (Silva *et al.*, 2012).

En contextos como el del estado de Michoacán, donde existen limitaciones estructurales e institucionales, este tipo de esquemas se vuelven aún más necesario. En consecuencia, este trabajo propone ampliar el concepto de gobernanza hacia la “gobernanza para la sustentabilidad”, entendida como: “Arte o manera de gobernar que se propone como objetivo el logro del desarrollo económico, social, ambiental, político, cultural y espiritual e institucional duradero, para garantizar a la ciudadanía un estilo de vida sustentable, promoviendo un sano equilibrio entre el Estado, la sociedad civil y el mercado”.

## Desafíos en la implementación de la Agenda 2030 a nivel municipal

La implementación efectiva de la Agenda 2030 en el ámbito local enfrenta importantes barreras. Martínez (2020) y Lara Salazar (2013) identifican obstáculos estructurales como la falta de capacidades técnicas y financieras, debilidades en los marcos normativos, baja coordinación interinstitucional y escasa cultura de planeación estratégica. La transversalización de los ODS en los planes municipales de desarrollo sigue siendo limitada. Aunque la innovación tecnológica puede ofrecer soluciones (Aylwin y Guerrero, 2010), su adopción depende de la existencia de condiciones institucionales propicias y marcos de gobernanza efectivos.

## La Carta de la Tierra y la Ética del Desarrollo Sustentable

La Carta de la Tierra (2000), adoptada en la Cumbre de Johannesburgo 2002, constituye un referente ético que orienta la acción hacia la sustentabilidad. Sus princi-

pios se centran del respeto y cuidado de la comunidad de la vida, la integridad ecológica, la justicia social y económica, así como la democracia, la no violencia y la paz. Su aplicación a nivel local permite que las políticas públicas se fundamenten en valores compartidos, facilitando su aceptación social, legitimidad y coherencia intersectorial.

### **Educación y empoderamiento ciudadano para la sustentabilidad**

La educación se reconoce como un catalizador fundamental para la sustentabilidad. En particular la educación ambiental, social y económica principalmente representa una herramienta clave para fomentar cambios en valores, actitudes y comportamientos orientados a la sustentabilidad. Toledo (2015) sostiene que una ciudadanía informada, crítica y con competencias para la acción colectiva es esencial para consolidar procesos de gobernanza efectivos y transformar los estilos de vida hacia modelos más sustentables. Esta transformación educativa es necesaria para empoderar a la ciudadanía, permitiendo una participación más efectiva en la gobernanza local, en coherencia con los principios de la Carta de la Tierra y los ODS de la Agenda 2030 (ONU, 2015).

El empoderamiento ciudadano, en este sentido, implica más que acceso a la información: requiere desarrollo de capacidades individuales y colectivas para participar eficazmente en la formulación, implementación y evaluación de políticas públicas. Leff (2004) destaca que la sustentabilidad y la gestión ambiental dependen de esta participación activa y consciente de la sociedad civil. Arnstein (1969) proporciona un marco útil para comprender los diferentes niveles de participación ciudadana, desde la manipulación hasta el control pleno. Fung (2006), por su parte, señala la importancia de diseñar mecanismos de participación diversos, inclusivos y adaptados al contexto. En línea con lo anterior, Castillo (2022) enfatiza que el empoderamiento ciudadano debe posibilitar la intervención directa de las comunidades en la identificación de problemas, la toma de decisiones y la evaluación de las políticas implementadas.

### **Integración de los aprendizajes en el ciclo de la política pública**

La integración de los aprendizajes sobre el movimiento evolutivo de la sustentabilidad dentro del ciclo de la política pública es esencial para lograr una gestión efectiva, transparente y adaptativa. Este enfoque permite que las políticas públicas no solo respondan a los desafíos, sino que se mantengan alineadas con los valores de respeto, equidad, justicia social y sustentabilidad,

adaptándose a contextos dinámicos.

Castillo (2022), plantea que un marco ético global debe orientar cada fase del ciclo de política pública — diagnóstico, diseño, implementación, evaluación y retroalimentación— guiado por la acción pública a través de principios éticos compartidos. La **figura 1** de este trabajo presenta cómo estos valores, inspirados en instrumentos como la Carta de la Tierra y el Acuerdo de Escazú, se incorporan al ciclo de políticas, garantizando el acceso a la información, la participación ciudadana y la justicia ambiental.

Este proceso de aprendizaje continuo se basa en la evaluación sistemática de resultados y en la capacidad institucional de ajustarse mediante mecanismos de retroalimentación, fortaleciendo así la gobernanza democrática. Lara Salazar (2013) y Martínez (2020) destacan que esta adaptación es clave para reforzar la legitimidad institucional y la confianza de la ciudadanía. Este enfoque, sustentado en un marco ético, asegura que las políticas públicas locales sean más inclusivas y respondan mejor a las dinámicas sociales, económicas y ambientales en constante cambio. En resumen, un ciclo de política pública orientado éticamente no solo incrementa la eficacia de las decisiones gubernamentales, sino que contribuye a la construcción de sociedades más justas, sustentables, resilientes y pacíficas.

### **Metodología**

La presente investigación con alcance exploratorio se diseñó como estudio de caso múltiple, a partir de la selección de 20 municipios representativos del estado de Michoacán (con menos de 150,000 habitantes), seleccionados por su diversidad geográfica social y administrativa, así como por su potencial para generar aprendizajes transferibles a otros contextos municipales con características similares.

Con el propósito de conocer las prácticas, limitaciones y oportunidades en la implementación de modelos de cogestión para el desarrollo sustentable, se aplicaron técnicas diversas que incluyeron entrevistas semiestructuradas, revisión documental, y observación participativa. Este proceso se complementó con el diseño de un procedimiento de Evaluación Participativa de la Sustentabilidad Municipal (EPSuM), orientado a fortalecer las capacidades institucionales y promover la participación ciudadana en la gobernanza local.

La investigación adoptó un enfoque mixto, con un énfasis predominante en métodos cualitativos, diseñado para capturar la percepción social. Para ello se desarrolló una técnica para la Evaluación Participativa de la Susten-

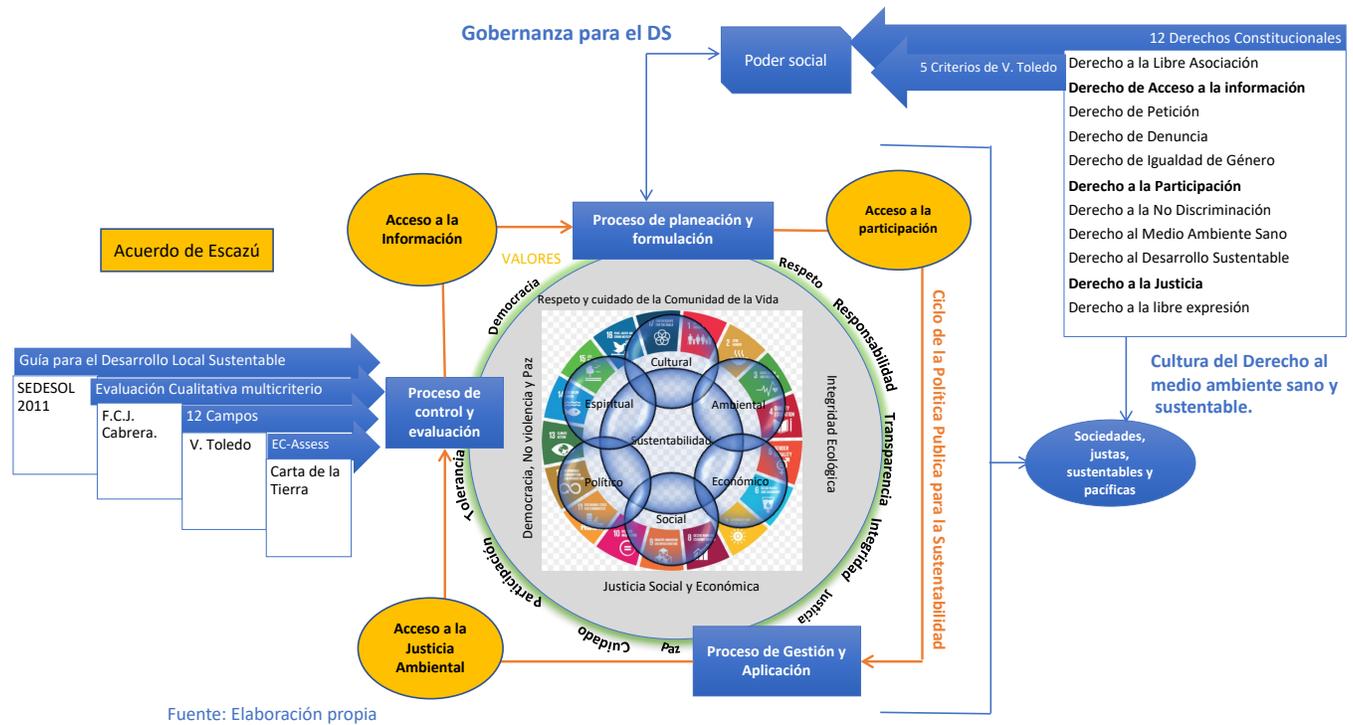


Figura 1. Integración de elementos para un mejor aprendizaje del concepto de Sustentabilidad.

tabilidad Municipal (EPSM), que comprende cinco fases: conceptual, planeación y diseño, recolección de datos, análisis y sistematización, y de conclusión o cierre.

### Fase 1: Conceptualización

La primera fase se centró en la selección de literatura relevante para construir un marco teórico robusto, que sustentara el análisis de los planes municipales de desarrollo (PMD) y guiara la discusión de los conceptos clave. Esta revisión permitió identificar los fundamentos teóricos y prácticos para la integración de la sustentabilidad en la gobernanza municipal.

### Fase 2: Planeación y diseño

En esta etapa, se realizó una revisión exhaustiva de modelos de evaluación participativa aplicables al contexto de los municipios de Michoacán. Se seleccionaron 20 municipios representativos de las diez regiones del Estado, recomendadas por el Instituto de Planeación del Estado de Michoacán (IPLAEM), asegurando una diversidad en términos de tamaño, recursos y desafíos locales. Esta selección fue crucial para garantizar que el estudio capturara una amplia gama de experiencias y prácticas en la implementación de políticas de sustentabilidad. Dichos municipios son: Apatzingán, Arteaga, Cotija, Cuitzeo, La Huacana, Huetamo, Jacona, Jiquilpan, Maravatío, Paracho, Pátzcuaro, La Piedad, Puruándiro, Santa Ana Maya, Tacámbaro, Turicato,

Uruapan, Zacapu, Zitácuaro, (Figura 2).

### Fase 3: recolección de datos

La fase empírica incluyó la recolección de datos primarios a través de entrevistas estructuradas con 11 alcaldes, miembros del cabildo y funcionarios municipales. Las entrevistas, respaldadas por un cuestionario mixto, se centraron en captar las percepciones y actitudes de los actores clave hacia la sustentabilidad y su integración en las políticas públicas municipales. Además, se realizó una revisión detallada de los PMD de los municipios seleccionados, utilizando una lista de verificación diseñada para evaluar la transversalización de la sustentabilidad en dichos planes.

### Fase 4: Análisis y sistematización

El análisis se enfocó en la identificación de barreras y en la evaluación de las capacidades locales para implementar políticas de desarrollo sustentable. La revisión de los PMD se realizó mediante una lista de verificación de 16 preguntas guía (Tabla 1), diseñada para observar el grado de integración de la sostenibilidad como una política pública prioritaria. Esta fase también incluyó una evaluación del marco legal vigente, con el objetivo de identificar las normativas que apoyan o limitan la implementación de la sostenibilidad en el ámbito municipal.

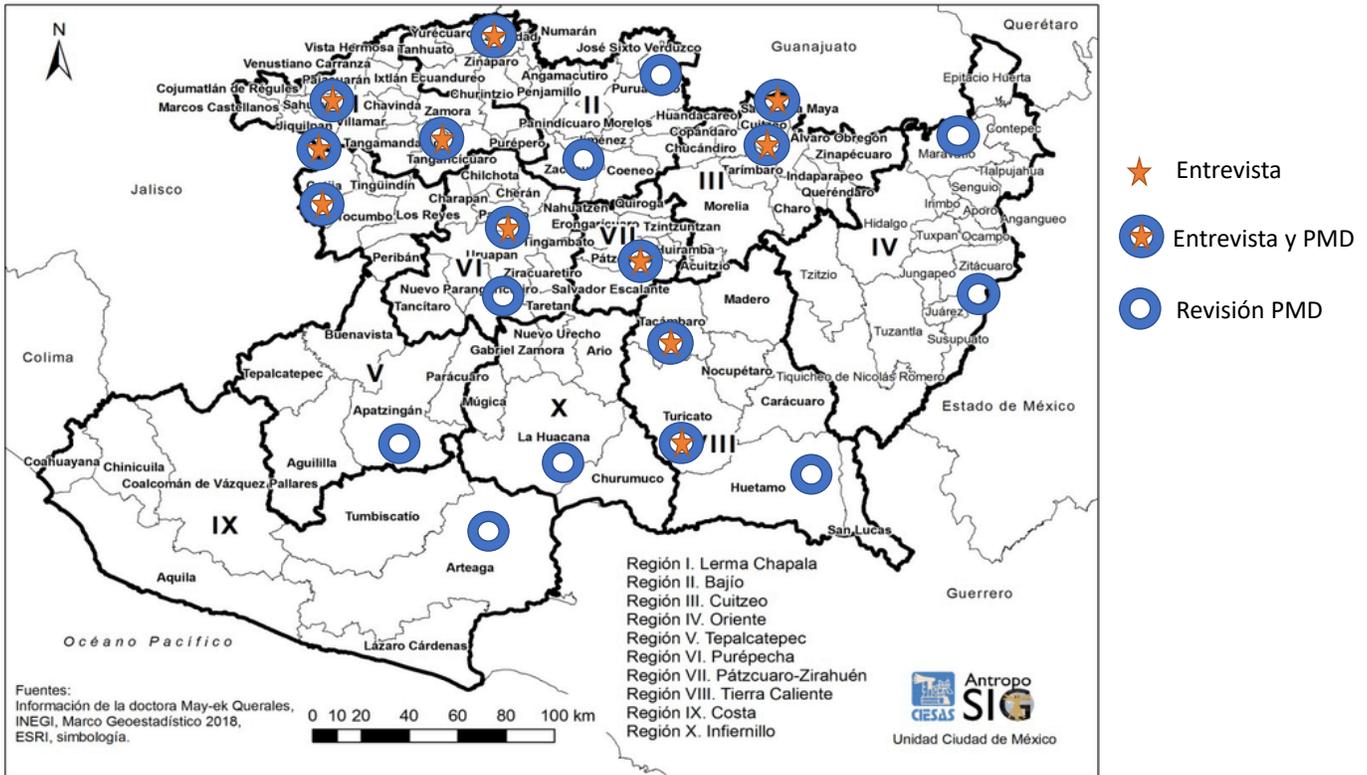


Figura 2. Municipios seleccionados para su estudio (revisión del PMD).

Fuente: INEGI, 2018.

**Fase 5: Conclusión**

Además de reflexionar sobre las conclusiones como respuesta a los objetivos propuestos, la fase final implicó el diseño de un instrumento de evaluación participativa.

**Diagrama del proceso metodológico**

El proceso metodológico seguido en este estudio se sintetiza en la Figura 3 que ilustra las fases de la investigación y las actividades clave realizadas en cada una de ellas, proporcionando una visión clara de la estructura y flujo de trabajo que guiaron el estudio.

**Instrumentos de recolección de datos**

Se utilizó principalmente la entrevista con guión semiestructurado por un cuestionario dividido en tres secciones: (i) Políticas, planes y programas de desarrollo local sustentable.; (ii) Recursos sociales y humanos disponibles; y (iii) Financiamiento y recursos económicos para el desarrollo sustentable.

Las entrevistas se dirigieron específicamente a los presidentes municipales, regidores de medio ambiente, y directores de planeación, quienes son los principales responsables de la toma de decisiones en relación con el Desarrollo Municipal Sustentable.

Es importante señalar que, si bien la pandemia de

COVID-19 impuso restricciones significativas, que limitó la realización de los talleres interactivos y otras actividades planificadas, el diseño del instrumento de evaluación fue debidamente completado.

Esta metodología proporcionó una base sólida para diseñar un sistema de autoevaluación del desarrollo sustentable municipal, fundamentado en principios de participación ciudadana y corresponsabilidad institucional. Este enfoque no solo permite identificar capacidades y debilidades en la gestión local, sino que también promueve una evaluación reconocible y legítima tanto por la sociedad como por el gobierno. Los hallazgos obtenidos permiten la formulación de un programa estratégico orientado a fortalecer la toma de decisiones en los cabildos municipales, con el objetivo de impulsar una gobernanza efectiva, transparente y comprometida con la sustentabilidad.

**Resultados**

Para esta investigación se revisaron los PMD de 20 municipios representativos del estado de Michoacán, lo que constituye el 18% de los 113 municipios del estado. Además, se realizaron entrevistas con 11 ayuntamientos (10% de los municipios), incluyendo a alcaldes, miem-

**Tabla 1.** Revisión de criterios afines a una política de sustentabilidad municipal desde los Planes de Desarrollo Municipal (PMD).

| CRITERIOS REVISADOS EN LOS PLANES DE DESARROLLO MUNICIPAL  | (06) Apatzingán   | (10) Arteaga | (19) Cotija | (20) Cuitzeo | (35) La Huacana | (38) Huetamo | (43) Jacona | (45) Jiquilpan | (50) Maravatío | (65) Paracho | (66) Pátzcuaro | (69) La Piedad | (76) Sahuayo | (78) Santa Ana Maya | (82) Tacámbaro | (97) Turicato | (102) Uruapan | (107) Zacapu | (112) Zitácuaro | (71) Puruándiro | TOTAL     |
|--|---|--------------|-------------|--------------|-----------------|--------------|-------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|---------------------|----------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
|  | <b>1</b> El objetivo general del PMD destaca la sustentabilidad como elemento importante. | NO           | NO          | NO           | SÍ              | SÍ           | NO          | NO             | NO             | NO           | NO             | NO             | NO           | SÍ                  | NO             | NO            | SÍ            | NO           | NO              | SÍ              | NO        |
| <b>2</b> La misión del PMD considera la sustentabilidad como eje fundamental.                                      | NO  | NO           | NO          | SÍ           | SÍ              | NO           | NO          | NO             | SÍ             | NO           | NO             | NO             | SÍ           | SÍ                  | NO             | NO            | NO            | NO           | SÍ              | NO              | <b>5</b>  |
| <b>3</b> La visión del PMD considera la sustentabilidad como un elemento orientador.                               | SÍ  | NO           | NO          | SÍ           | SÍ              | NO           | NO          | NO             | NO             | NO           | NO             | SÍ             | NO           | NO                  | NO             | SÍ            | NO            | NO           | SÍ              | SÍ              | <b>7</b>  |
| <b>4</b> Concepto de sustentabilidad explícitamente definido en el PMD.  | NO  | NO           | NO          | NO           | Parcial         | NO           | NO          | NO             | SÍ             | NO           | NO             | NO             | NO           | SI                  | SI             | NO            | NO            | NO           | NO              | NO              | <b>3</b>  |
| <b>5</b> Articulación del PMD con la agenda 2030 y los ODS.  | NO  | NO           | NO          | NO           | SÍ              | NO           | NO          | SÍ             | NO             | NO           | NO             | NO             | NO           | NO                  | NO             | SÍ            | SÍ            | NO           | Parcial         | SÍ              | <b>6</b>  |
| <b>6</b> Inclusión en el PMD de indicadores congruentes con los ODS  | NO  | NO           | NO          | NO           | SÍ              | SÍ           | NO          | NO             | SÍ             | NO           | NO             | SÍ             | SÍ           | NO                  | NO             | NO            | NO            | NO           | SÍ              | NO              | <b>6</b>  |
| <b>7</b> Consideración de los aspectos social, económico y ambiental como ejes y/o líneas estratégicas del PDM.    | SÍ  | SÍ           | SÍ          | SÍ           | SÍ              | SÍ           | SÍ          | NO             | SÍ             | NO           | SÍ             | SÍ             | SÍ           | SÍ                  | SÍ             | SÍ            | SÍ            | SÍ           | SÍ              | SÍ              | <b>18</b> |
| <b>8</b> Consideración de valores articulados a la sustentabilidad en el PDM.                                      | NO  | NO           | NO          | NO           | SÍ              | SÍ           | NO          | NO             | SÍ             | NO           | SÍ             | NO             | SÍ           | NO                  | NO             | NO            | NO            | NO           | NO              | NO              | <b>5</b>  |
| <b>9</b> Valores articulados a la sustentabilidad definidos en el PDM para mejor comprensión y toma de decisiones. | NO  | NO           | NO          | NO           | SÍ              | SÍ           | NO          | NO             | SÍ             | NO           | NO             | NO             | NO           | NO                  | NO             | NO            | SÍ            | NO           | NO              | SÍ              | <b>5</b>  |
| <b>10</b> El PMD se alinea al marco normativo nacional e internacional de la sustentabilidad.                      | NO  | NO           | NO          | NO           | SÍ              | NO           | NO          | NO             | NO             | NO           | NO             | NO             | NO           | NO                  | NO             | SÍ            | SÍ            | NO           | Parcial         | NO              | <b>4</b>  |

|    |  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |
|----|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|----|----|
| 11 | <b>Congestión ayuntamiento-ciudadanía</b> considerada como estrategia de articulación para la sustentabilidad en el PMD. | SÍ | SÍ | NO | SÍ | SÍ | SÍ | NO | NO | SÍ | NO | NO      | SÍ | 15 |
| 12 | <b>Reconocimiento de a sustentabilidad como política prioritaria</b> en el PMD.  | NO | NO | NO | SÍ | SÍ | SÍ | NO | NO | SÍ | NO | NO | SÍ | SÍ | NO | NO | SÍ | NO | NO | Parcial | NO | 8  |
| 13 | <b>El PMD plantea un mecanismo participativo de evaluación</b> del mismo y/o promueve la participación ciudadana.        | SÍ | NO | SÍ | SÍ | SÍ | SÍ | NO | NO | SÍ | SÍ | NO | SÍ      | SÍ | 16 |
| 14 | <b>Los lineamientos del INAFED</b> están considerados en el PMD.   | SÍ | NO | NO | NO | NO | SÍ | SÍ | NO | SÍ | NO | NO | SÍ | SÍ | SÍ | NO | NO | NO | NO | SÍ      | NO | 8  |
| 15 | <b>El COPLADEMUN es considerado</b> en el PMD como un espacio de participación para dar seguimiento.                     | SÍ | NO | NO | SÍ | SÍ | SÍ | NO | NO | SÍ | NO | NO | SÍ | SÍ | NO | SÍ | SÍ | SÍ | NO | SÍ      | SÍ | 12 |
| 16 | Total de menciones asociadas a sustentabilidad   | 35 | 8  | 2  | 17 | 52 | 19 | 7  | 14 | 57 | 4  | 8  | 10 | 47 | 12 | 26 | 20 | 10 | 5  | 11      | 13 |    |
| 17 | Total de elementos afines para emprender una política de sustentabilidad municipal                                       | 6  | 2  | 2  | 8  | 13 | 9  | 2  | 1  | 11 | 2  | 3  | 8  | 10 | 6  | 5  | 9  | 7  | 2  | 11      | 7  |    |

|                |   |
|----------------|---|
| Observaciones: |   |
| Muy alta       | Criterio o municipio con 10 o más menciones.  |
| Alta           | Criterio o municipio con 7 a 9 menciones.     |
| Regular        | Criterio o municipio con 4 a 6 menciones.     |
| Baja           | Criterio o municipio con 3 o menos menciones. |

bro del cabildo y funcionarios de áreas clave como planeación y medio ambiente.

### Instrumentación de la Sustentabilidad en los PMD

Los resultados muestran que la mayoría de los municipios estudiados carecen de un entendimiento claro y coherente del concepto de sustentabilidad como política pública transversal. A pesar de que algunos PMD mencionan términos como «desarrollo sustentable», «sostenible», «sostenibilidad» o «sustentabilidad», con frecuencia (Figura 4), en general, el uso de estos términos es inconsistente y no está respaldado por una definición

clara o una estrategia coherente. Por ejemplo, en Maravatío se menciona 57 veces el término «sustentabilidad», mientras que La Huacana lo hace 49 veces, pero en ambos casos, la sustentabilidad no está debidamente definida ni integrada en las políticas del municipio.

### Marco normativo y planeación estratégica

El análisis del marco normativo reveló que solo un 20% de los PMD citan algún marco normativo internacional, como la Agenda 2030, mientras que el 63% de los funcionarios entrevistados declararon contar con un marco normativo, pero no pudieron especificar qué

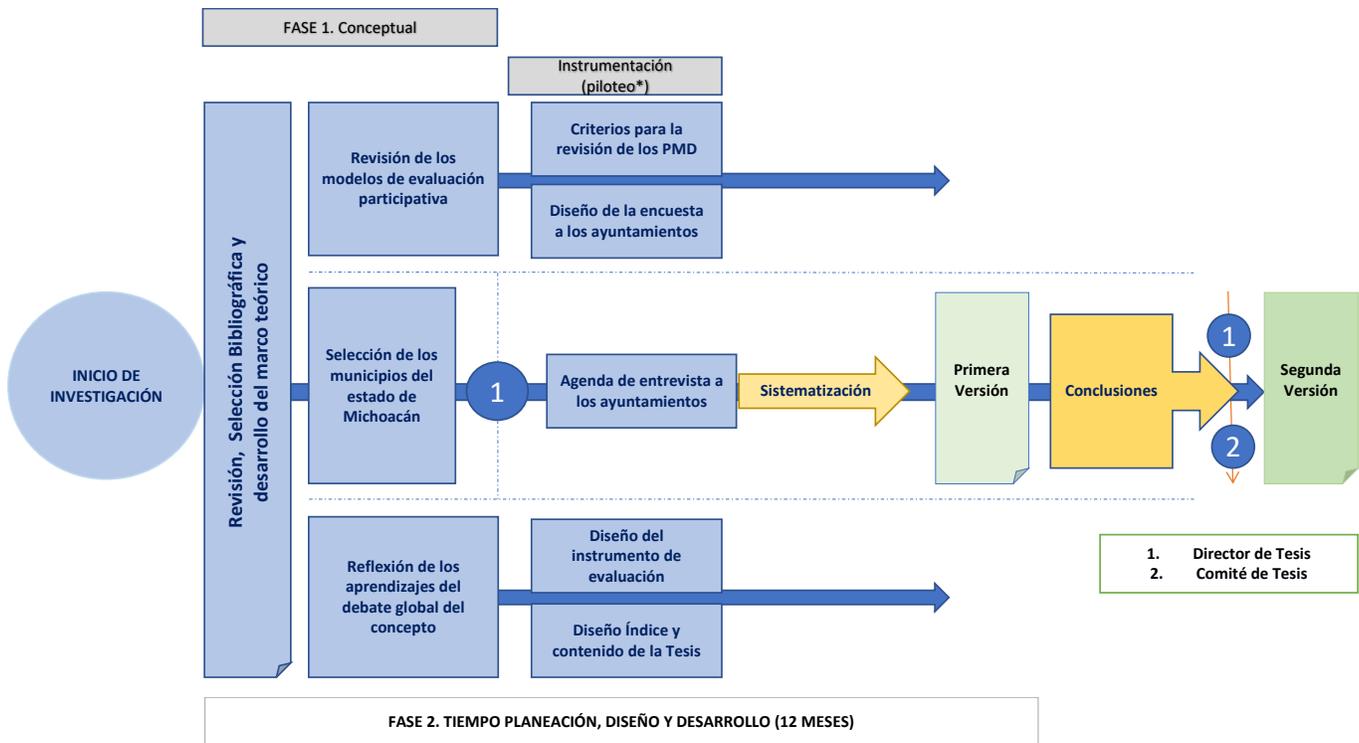


Figura 3. Diagrama del proceso metodológico de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

instrumentos forman parte de este marco más allá de normativas básicas como el Bando de Buen Gobierno (Figura 5). Además, la planificación estratégica para transversalizar la sustentabilidad en los PMD es limitada; solo el 36% de los alcaldes consideran la sustentabilidad como una prioridad en sus planes.

### Participación ciudadana y evaluación de la sustentabilidad

La participación ciudadana es mencionada como un instrumento para la toma de decisiones en el 75% de los PMD revisados. Sin embargo, solo el 60% de estos planes incluyen un mecanismo participativo formal como el Comité de Planeación para el Desarrollo Municipal (COPLADEMUN) (Figura 6). A pesar de esto, la implementación efectiva de la participación ciudadana en la evaluación de la sustentabilidad es limitada y, en muchos casos, los mecanismos existentes no son suficientemente robustos para garantizar una cogestión efectiva.

### Financiamiento y Recursos Económicos para el Desarrollo sustentable Municipal (DSM)

La Figura 7 revela un panorama crítico en torno a la disponibilidad y gestión de recursos económicos para el Desarrollo Sustentable Municipal (DSM).

Aunque algunos municipios reportan esfuerzos como la participación en gestión de fondos (6 de 11) o la inclusión de presupuestos específicos (5 de 11), estos avances siguen siendo insuficientes. Solo 1 municipio destina un porcentaje explícito del presupuesto al desarrollo sustentable, lo que demuestra la falta de institucionalización del financiamiento para la sustentabilidad.

La dependencia de recursos estatales y federales también es preocupante: 7 de los 11 municipios entrevistados indicaron no recibir financiamiento estatal ni federal para acciones de sustentabilidad. Aún más crítico es que 9 o más municipios no acceden a financiamiento externo, ya sea nacional o extranjero, ni promueven campañas ciudadanas para la recaudación de fondos.

Estas cifras indican una debilidad estructural en la planificación financiera para el DSM, lo que limita considerablemente la viabilidad de implementar políticas sustentables a largo plazo. La ausencia de informes financieros del presidente municipal sobre sustentabilidad y la escasa vinculación con el sector privado agravan este escenario. Se requiere con urgencia el diseño de mecanismos normativos e institucionales que garanticen la asignación presupuestal efectiva y permanente para el desarrollo sustentable local.

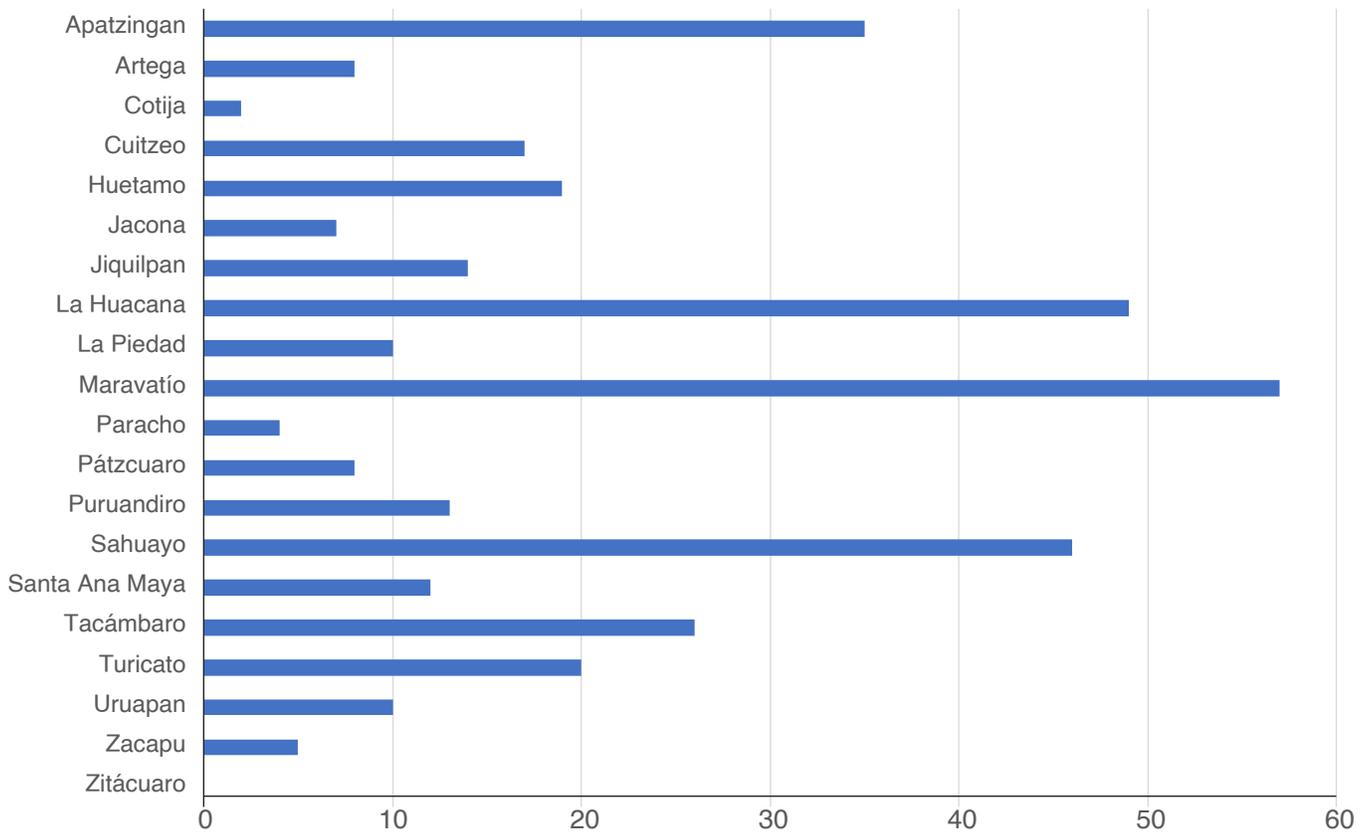


Figura 4. Frecuencia de mención de términos relacionados con la sustentabilidad en los PMD.

**Recursos sociales, humanos y económicos**

En cuanto a los recursos sociales y humanos, solo el 45% de los ayuntamientos cuentan con personal capacitado en temas de sustentabilidad. Además, el financiamiento específico para acciones de sustentabilidad es escaso. Solo el 27% de los municipios entrevistados manifestaron contar con un presupuesto específico para acciones relacionadas con la sustentabilidad (Figura 8).

**Evaluación global de la sustentabilidad en los municipios**

Finalmente, la evaluación global de la sustentabilidad en los municipios muestra que los más alineados con una política de sustentabilidad de acuerdo a los criterios descritos en la Tabla 1, son La Huacana, Zitácuaro, Maravatío y Sahuayo, mientras que municipios como Arteaga, Jiquilpan y Paracho muestran un bajo nivel de alineación (Figura 9).

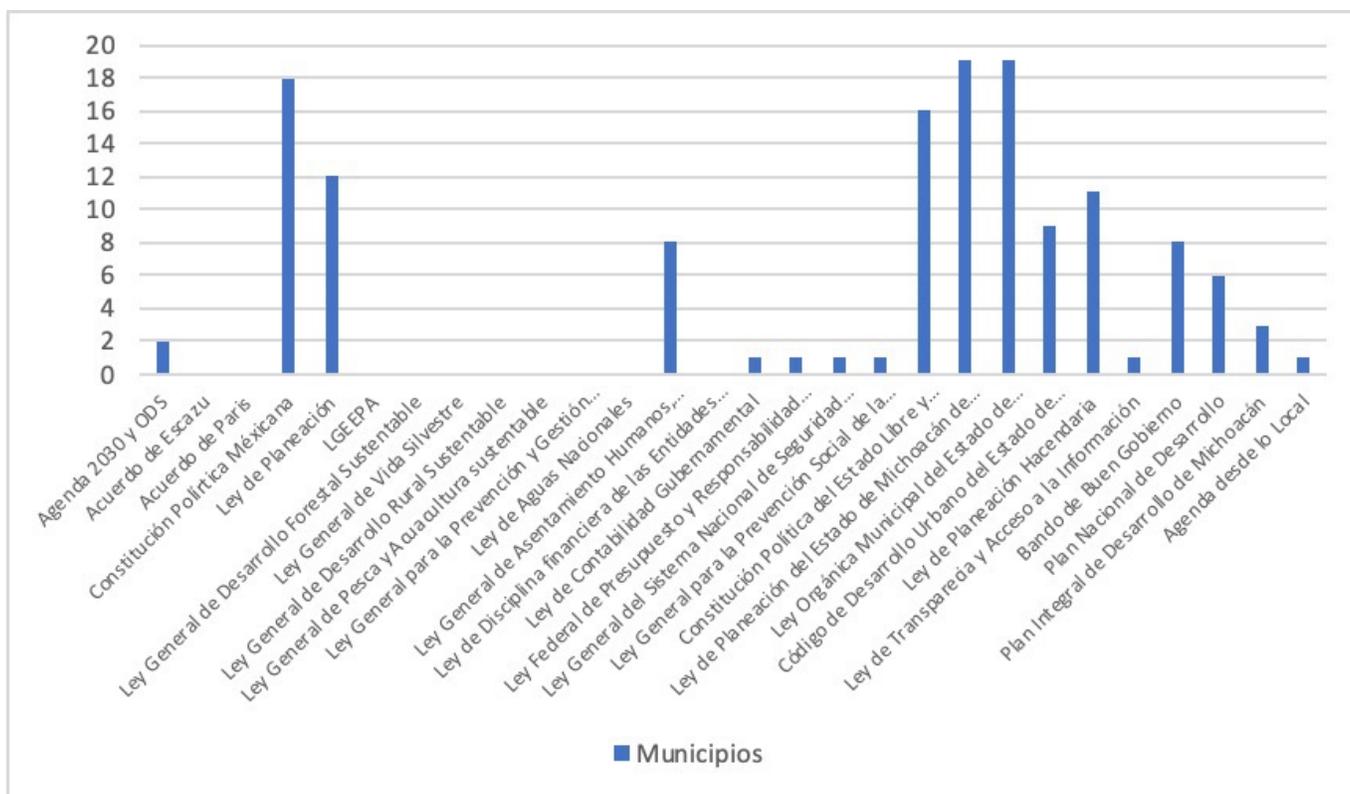
Hasta aquí, los hallazgos de esta investigación destacan la necesidad urgente de fortalecer tanto el marco normativo como la capacidad institucional en los municipios para transversalizar la sustentabilidad como política pública. Aunque algunos municipios han dado pasos hacia la integración de principios de desarrollo sustentable en sus planes de desarrollo, la

falta de claridad conceptual y de mecanismos efectivos de participación ciudadana y evaluación sigue siendo un obstáculo importante. Este estudio sugiere que un enfoque más coherente y participativo, apoyado por una infraestructura normativa y de recursos adecuada, es esencial para avanzar hacia una verdadera sustentabilidad municipal en Michoacán.

**Discusión de resultados**

La integración de la sustentabilidad como política pública requiere un enfoque multidimensional que incluya la educación para el desarrollo sustentable, la participación ciudadana, la gestión integral de recursos y la adopción de tecnologías sostenibles. La Carta de la Tierra proporciona un marco valioso para guiar estos esfuerzos, promoviendo la justicia social, el respeto por la diversidad cultural y la protección de los ecosistemas y medio ambiente.

Los resultados de este trabajo revelan varios desafíos y oportunidades en la implementación de políticas de desarrollo sustentable a nivel municipal en Michoacán. A pesar de que la sustentabilidad es mencionada frecuentemente en los Planes Municipales de Desarrollo (PMD), la falta de una definición clara y la inconsistencia



**Figura 5.** Marco jurídico internacional, nacional, estatal y local para el desarrollo sustentable considerado entre los municipios analizados.

Fuente: elaboración propia con base a la revisión de 20 PMD.

en su aplicación evidencian una comprensión limitada del concepto entre los gobiernos locales. Este hallazgo es consistente con estudios previos que han señalado la falta de claridad conceptual como una barrera significativa para la implementación efectiva de la sustentabilidad en el ámbito local (Villalobos y González, 2019; Martínez, 2020).

### Desafíos en la transversalización de la sustentabilidad

El análisis de los PMD mostró que, aunque algunos municipios mencionan términos relacionados con la sustentabilidad, la integración de estos principios en la planificación estratégica es limitada. Solo el 36% de los alcaldes entrevistados consideran la sustentabilidad como una prioridad en sus planes, lo que sugiere que la sustentabilidad sigue siendo vista como una cuestión secundaria o complementaria en lugar de un eje central de la gobernanza municipal (Castillo, 2022, p. 67). Esta situación es particularmente preocupante en un contexto en el que los municipios tienen un papel crucial en la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tal como lo establece la Agenda 2030 (ONU, 2015).

Además, el estudio encontró que solo el 20% de los

PMD hacen referencia explícita a marcos normativos internacionales como la Agenda 2030, y el 63% de los funcionarios entrevistados no pudieron especificar qué instrumentos forman parte del marco normativo que debería guiar la implementación de la sustentabilidad (Castillo, 2022, p. 74). Este hallazgo subraya la necesidad de fortalecer la capacitación y formación de los funcionarios municipales para que comprendan mejor las obligaciones y oportunidades asociadas con los ODS.

### Participación ciudadana y evaluación de la sustentabilidad

Aunque el 75% de los PMD revisados mencionan la participación ciudadana, solo el 60% incluye un mecanismo formal como el Comité de Planeación para el Desarrollo Municipal (COPLADEMUN). Este hallazgo revela una brecha entre el reconocimiento discursivo de la participación ciudadana y su práctica efectiva en la gobernanza local.

Frente a esta limitación, los Comités Ciudadanos para la Evaluación de la Sustentabilidad Municipal (CCE-SuM) se presentan como una alternativa viable para institucionalizar procesos participativos en la toma de decisiones. Estos comités fortalecen la evaluación participativa e incentivan el empoderamiento ciudadano en

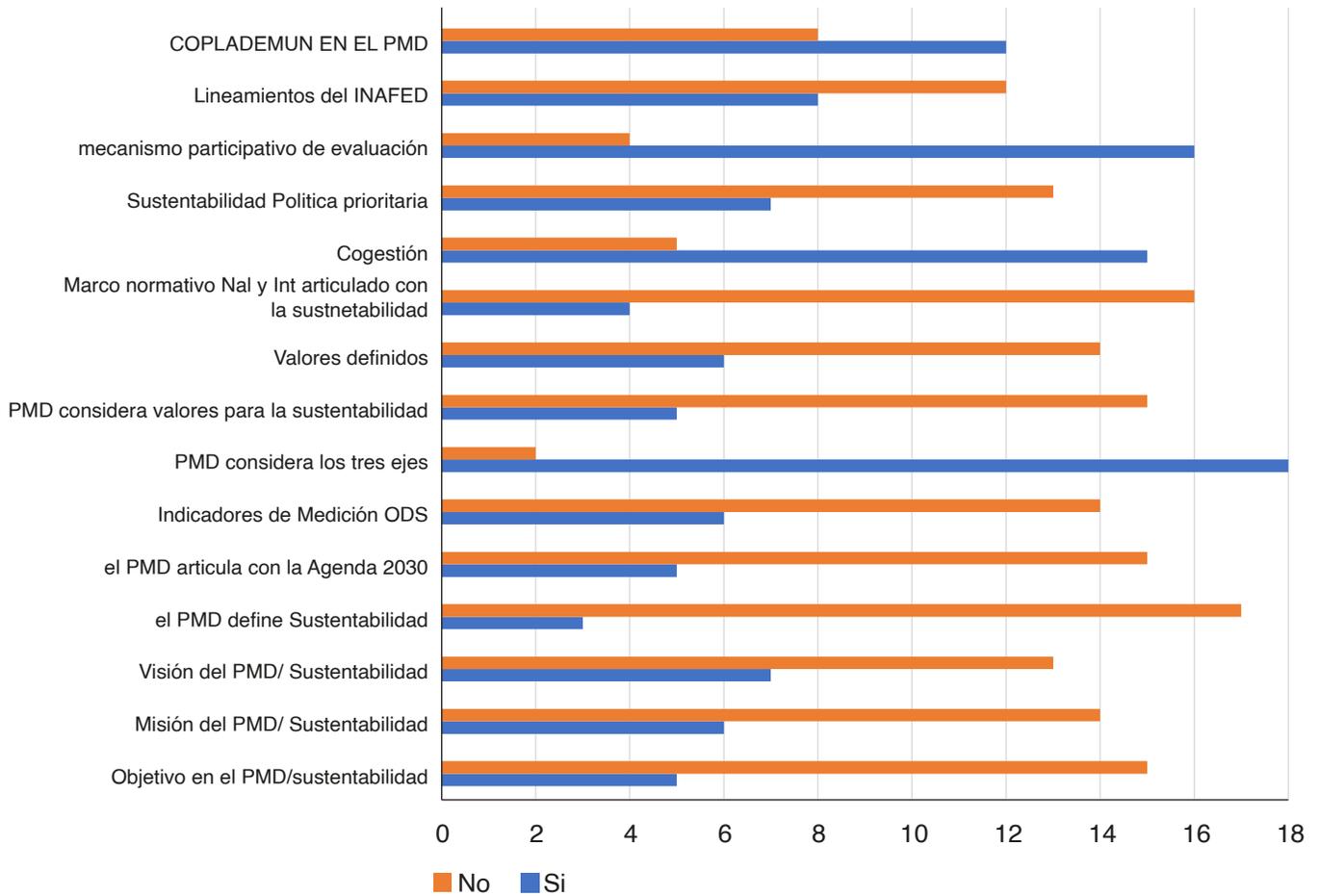


Figura 6. Articulación del PMD con la sustentabilidad como política.

la gestión pública, promoviendo una gobernanza más transparente y corresponsable (Castillo, 2022, p. 88). La literatura respalda este enfoque al señalar que la evaluación participativa contribuye a mejorar la legitimidad, transparencia y eficacia de la rendición de cuentas en la gestión pública (Arnstein, 1969; Fung, 2006).

### Recursos y capacidades locales

Otro hallazgo crítico es la falta de recursos humanos y financieros adecuados para la implementación de políticas de desarrollo sustentable. Solo el 45% de los ayuntamientos cuentan con personal capacitado en temas de sustentabilidad, y apenas el 27% tiene un presupuesto específico para acciones relacionadas en este ámbito (Castillo, 2022, p. 91). Este déficit de capacidades y recursos limita significativamente la capacidad de desarrollar e implementar políticas públicas efectivas.

La Figura 7 muestra la situación que prevalece en los 20 municipios respecto de instrumentos de política y planeación para el desarrollo sustentable. Resume los avances y vacíos en las políticas, planes y programas municipales, y destaca la necesidad urgente de inversio-

nes en formación y en la creación de estructuras institucionales que respalden la sustentabilidad a largo plazo (Castillo, 2022, p. 93). Sin un compromiso financiero y humano sostenido, los esfuerzos para integrar la sustentabilidad en la gobernanza local probablemente seguirán siendo insuficientes.

### Implicaciones teóricas y prácticas

Este estudio contribuye al debate sobre la gobernanza local y la sustentabilidad al destacar la necesidad de un enfoque más coherente e inclusivo en la implementación de políticas de desarrollo sustentable. Los hallazgos subrayan la importancia de fortalecer los marcos normativos y asegurar que la participación ciudadana deje de ser solo un principio enunciado para convertirse en una práctica estructurada e institucionalizada. Asimismo, el estudio evidencia la urgencia de subsanar las carencias de capacidades y recursos en los municipios, lo que tiene implicaciones directas para la formulación de políticas y la asignación de recursos en el contexto de la Agenda 2030.

En resumen, los resultados de este estudio destacan

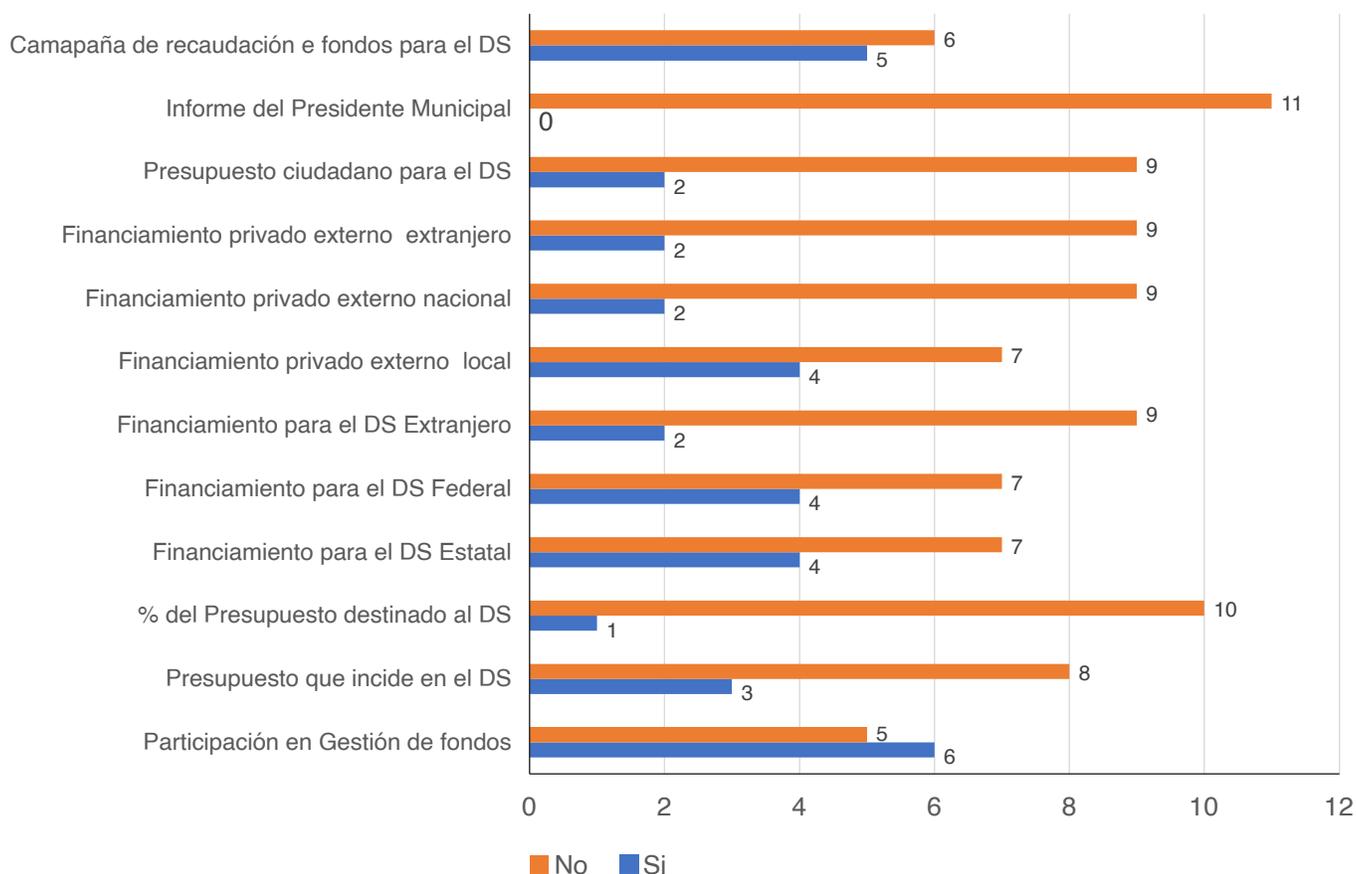


Figura 7. Financiamiento y recursos económicos para el Desarrollo Sustentable Municipal (DSM).

la necesidad de una mayor coherencia conceptual, una planificación estratégica más robusta y una participación ciudadana efectiva en la gobernanza local para avanzar hacia un desarrollo sustentable en Michoacán. La implementación de mecanismos como los CCESuM, y la inversión en capacidades institucionales son pasos fundamentales para superar las barreras identificadas y asegurar que la sostenibilidad se convierta en un pilar fundamental de la política municipal.

### Conclusiones

La presente investigación ha permitido mostrar que la sustentabilidad aún no se integra de forma robusta y transversal como política en el ámbito de gobiernos locales en Michoacán. Aun cuando los discursos y documentos oficiales incluyen referencias al desarrollo sustentable, su implementación práctica es limitada, fragmentada y frecuentemente desvinculada de los marcos normativos internacionales y nacionales. El estudio ha evidenciado la necesidad de reconfigurar los fundamentos conceptuales, institucionales y operativos de la

gobernanza local para transitar hacia un Desarrollo Municipal Sustentable (DMS) con enfoque participativo y corresponsable.

### Transversalización de la sustentabilidad

Uno de los hallazgos más significativos de esta investigación fue constatar que la sustentabilidad aparece mencionada en los Planes Municipales de Desarrollo (PMD), no se ha convertido en un eje operativo ni en una prioridad estratégica para la mayoría de los gobiernos locales. La falta de claridad conceptual, sumada a una débil apropiación institucional, ha contribuido a que la sustentabilidad permanezca como una aspiración más que como una guía efectiva para la acción pública (Castillo, 2022). A ello se suma la carencia de un marco normativo sólido que promueva y regule su integración en los instrumentos de planeación y evaluación municipales. Esta limitación demanda una revisión de las leyes estatales y municipales, así como la generación de lineamientos técnicos que permitan incorporar los principios del desarrollo sustentable como criterios obligatorios en los procesos de gestión pública.

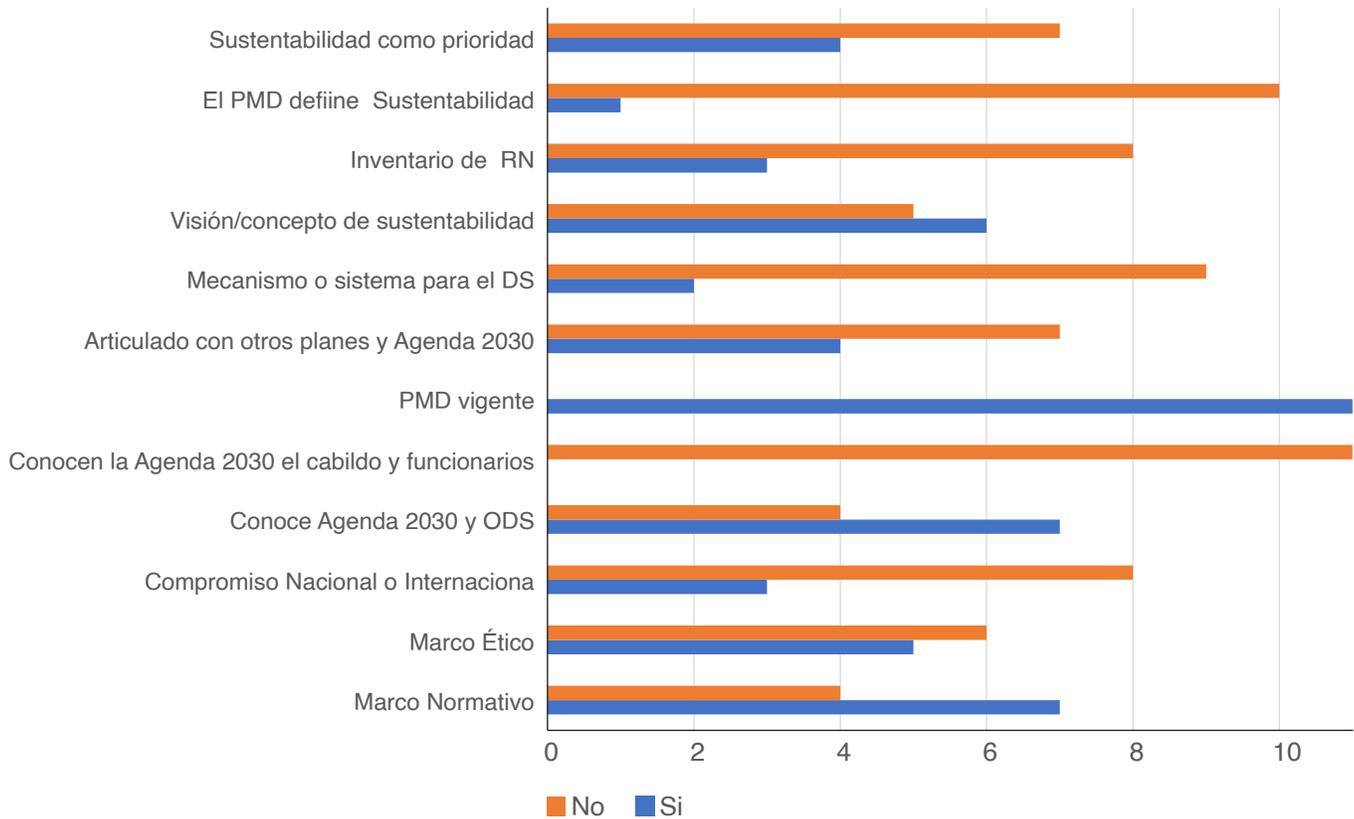


Figura 8. Políticas, planes, programas e instrumentos para el DMS.

**Hacia una redefinición de gobernanza para la sustentabilidad**

En respuesta a los vacíos conceptuales identificados, esta investigación propone una redefinición de la gobernanza desde un enfoque orientado explícitamente hacia la sustentabilidad. Bajo esta perspectiva, se sugiere que la Real Academia Española incorpore la expresión “Gobernanza para la Sustentabilidad”, entendida como una forma de gobernanza centrada en el logro de un desarrollo armonizador –económico, social, ambiental, político, cultural y espiritual, con equidad y visión de largo plazo.

Este enfoque plantea una gobernanza ampliada que reconoce la diversidad de actores implicados: desde los tomadores de decisiones hasta la sociedad civil, pasando por expertos, académicos, y sectores productivos. Todos ellos deben participar activamente en la formulación, ejecución y evaluación de las políticas públicas. La Gobernanza para la sustentabilidad, además de ser una categoría analítica, se constituye como una propuesta ética y práctica para construir sociedades, resilientes, justas y en armonía con su entorno.

**Participación ciudadana y gobernanza**

El estudio reveló, que, si bien existen estructuras formales de participación ciudadana en el ámbito municipal

–como los COPLADEMUN o los consejos Municipales de Desarrollo--, estas no han sido fortalecidas ni adecuadamente institucionalizadas. La participación social en muchos casos sigue siendo limitada y poco influyente en las decisiones sustantivas del gobierno local. En este contexto, los Comites Ciudadanos para la Evaluación de la Sustentabilidad Municipal (CCESuM) se perfila como una estrategia viable para institucionalizar la participación social, fortalecer la evaluación participativa e incentivar la corresponsabilidad ciudadana. Su implementación requiere voluntad política, formación técnica y recursos adecuados para su funcionamiento autónomo y eficaz.

**Empoderamiento y educación para la sustentabilidad**

Un hallazgo fundamental es la urgencia de fortalecer la formación ciudadana y gubernamental en materia de sustentabilidad. La investigación propone como medida prioritaria el diseño e implementación de un programa de Alfabetación política para la Sustentabilidad, dirigido tanto a funcionarios públicos como a organizaciones sociales y ciudadanía en general. Este programa debe promover no solo el conocimiento técnico, sino también el desarrollo de competencias críticas, éticas y partici-

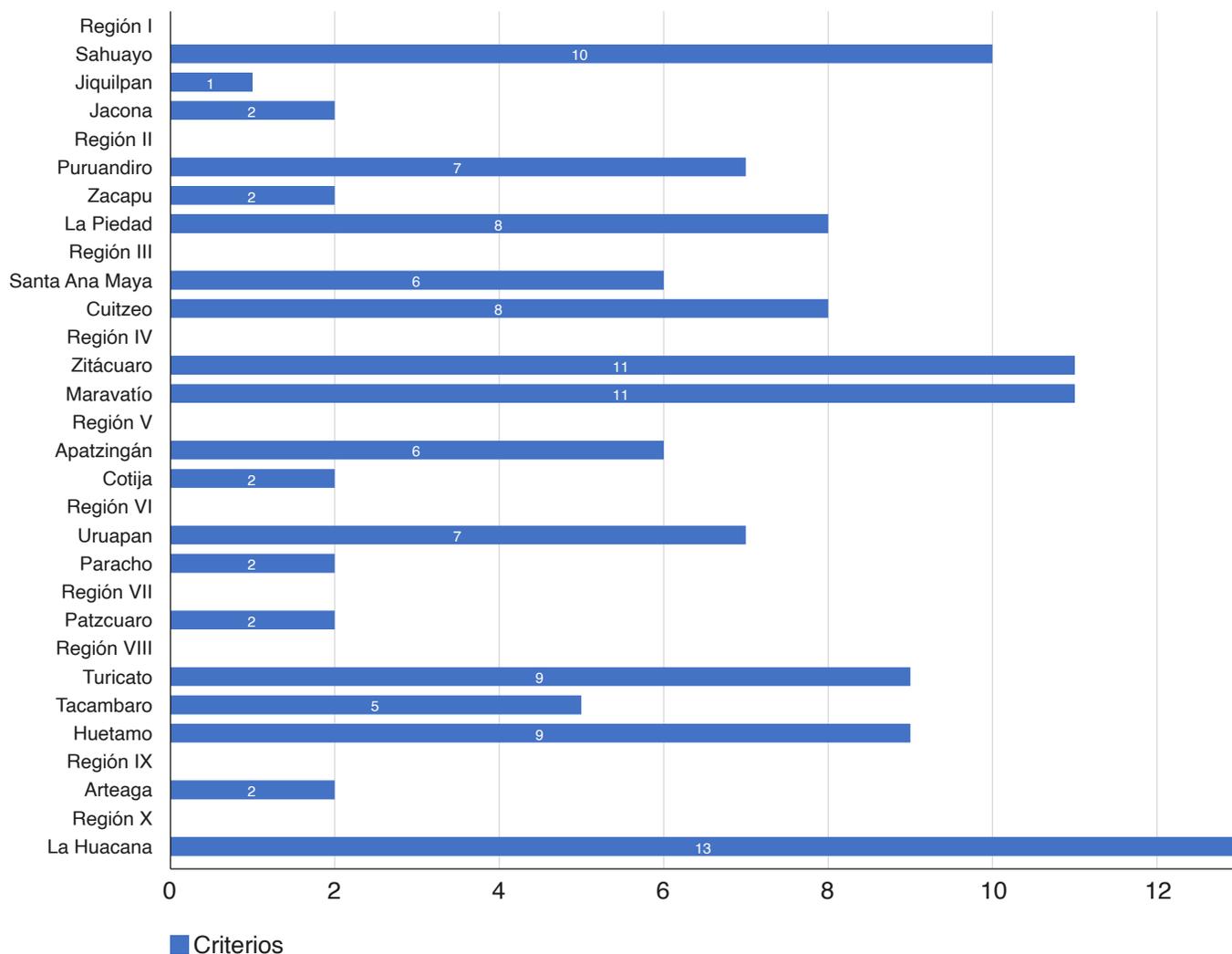


Figura 9. Criterios generales para observar la sustentabilidad en los PMD.

pativas.

La Educación continua y transformadora es clave para consolidar una ciudadanía activa, conscientes de sus derechos y responsabilidades, capaz de exigir rendición de cuentas y de participar en la construcción de políticas públicas sustentables. Este proceso educativo debe ser permanente, incluyente y contextualizado, y debe formar parte de una estrategia institucional que dé continuidad a las acciones más allá de los ciclos gubernamentales.

### Desafíos y recomendaciones

Los municipios enfrentan múltiples obstáculos para implementar la sustentabilidad como política transversal. Entre ellos destacan la falta de personal capacitado, la escasa asignación presupuestaria y la débil articulación entre niveles de gobierno. Sólo el 45% de los municipios analizados cuenta con personal técnico en el tema, y apenas el 27% destina recursos específicos para este fin

(Castillo, 2022).

Se recomienda, por tanto, fortalecer las capacidades institucionales mediante programas de formación especializada, incorporar la sustentabilidad en las estructuras orgánicas municipales y asegurar recursos financieros permanentes. Asimismo, la reciente Ley Orgánica de la Administración Pública Municipal del Estado de Michoacán (2021) representa una oportunidad para delimitar con mayor precisión las competencias de los gobiernos municipales en materia de sustentabilidad. No obstante, su aplicación dependerá del involucramiento activo de la ciudadanía y de la voluntad política de los actores institucionales.

### Implicaciones futuras

Este estudio ofrece un marco conceptual, ético y metodológico para la transformación de la gobernanza local hacia un modelo más participativo, transparente y sus-

tentable. La construcción de un sistema de evaluación participativa, como el propuesto en esta investigación, permitirá a los municipios contar con herramientas efectivas para monitorear su avance, identificar rezagos y tomar decisiones informadas.

La implementación de un índice de sustentabilidad municipal construido con participación ciudadana y adaptado a los contextos locales puede ser un instrumento clave para institucionalizar la sustentabilidad como eje rector de la gestión pública. Esto contribuirá no solo a mejorar el desempeño institucional, sino también a consolidar la confianza entre ciudadanía y gobierno.

En suma, esta investigación demuestra que, a pesar de los avances normativos y discursivos, la implementación efectiva de la sustentabilidad en el ámbito municipal sigue siendo limitada. El fortalecimiento institucional, el empoderamiento ciudadano, la redefinición de la gobernanza y la alfabetización política son pilares indispensables para lograr un Desarrollo Municipal Sustentable. Solo mediante un enfoque de cogestión corresponsable será posible construir municipios más justos, resilientes y comprometidos con la vida en todas sus formas.

## Referencias

- Arnstein SR (1969). A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners* 35(4):216-224. doi:10.1080/01944366908977225
- Aylwin J, Guerrero C (2010). *Innovación tecnológica y sostenibilidad*. Revista de Tecnología y Sociedad.
- Brundtland GH (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. Oxford University Press.
- Carta de la Tierra (2000). *Principios y valores para un futuro sostenible*. Disponible en: <http://cartadelatierra.org>
- Castillo M (2022). *Cogestión y Gobernanza Municipal para el Desarrollo Sustentable en Michoacán, México*. [Tesis doctoral, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Consortio Mexicano de Instituciones de Educación Superior para la Sustentabilidad (COMPLEXUS) (2020). *Sustentabilidad en la educación superior: Un enfoque integral*. Ediciones COMPLEXUS.
- Fung A (2006). Varieties of participation in complex governance. *Public Administration Review* 66(s1):66-75. doi:10.1111/j.1540-6210.2006.00667.x
- Lara Salazar L (2013). *La gobernanza local y el desarrollo sustentable: Un enfoque desde la participación ciudadana*. Fondo de Cultura Económica.
- Leff E (2004). *Gestión ambiental y desarrollo sustentable*. Fondo de Cultura Económica.
- Martínez JL (2020). Desafíos en la implementación de la Agenda 2030 en el ámbito municipal: Un análisis de casos en México. *Revista de Estudios Urbanos y Regionales* 46(2):187-202. doi:10.1016/j.reur.2020.06.001
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Peters BG, Pierre J (2001). Developments in intergovernmental relations: Towards multi-level governance. *Policy & Politics* 29(2):131-135.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (1982). *Carta Mundial de la Naturaleza*. PNUMA.
- Silva J, Pérez R, Gómez M (2012). *Participación ciudadana y sustentabilidad municipal*. Editorial Universidad de México.
- Silva CL, Pérez R, Gómez A (2012). Cogestión municipal para la sustentabilidad: Experiencias y desafíos. *Revista Latinoamericana de Administración Pública* 8(1)101-120.
- The Earth Charter Initiative. (2000). *The Earth Charter*. <https://earthcharter.org/read-the-earth-charter/>
- Toledo VM (2015). Educación ambiental y sustentabilidad: Claves para una ciudadanía planetaria. *Revista Ecología y Sociedad* 20(1):13-22.
- Toledo VM (2015). *Ecocidio en México: La batalla final es por la vida*. Penguin Random House Grupo Editorial México.



# Cambio estructural en México y Ecuador: el papel de la Inversión Extranjera Directa y nacional, y la apertura comercial

## Structural Change in Mexico and Ecuador: The Role of National and Foreign Direct Investment, and Economic Openness

Andrés Blancas Neria<sup>1</sup> , Lizeth Ramón Jaramillo\*<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>2</sup> División de Estudios sobre el Desarrollo, Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C.

### Historial

Manuscrito recibido: 25 de julio de 2024

Manuscrito aceptado: 13 de mayo de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

### \*Autor para correspondencia

Lizeth Ramón Jaramillo

[lizeth.ramon@cide.edu](mailto:lizeth.ramon@cide.edu)

ORCID: 0000-0002-1292-8127

### Resumen

El presente documento analiza el proceso de cambio estructural generado por la Inversión Extranjera Directa (IED), las inversiones nacionales y la apertura económica en dos países emergentes, México y Ecuador. Los resultados de la modelación econométrica indican que en ambos países se han producido cambios en sus estructuras productivas en la primera década del siglo XXI, provocados por diferentes factores. En Ecuador, la apertura comercial y la inversión privada han sido elementos importantes para el cambio estructural, mientras que en México el cambio estructural también ha estado influenciado por la IED y la inversión pública.

**Palabras clave:** cambio estructural, economías emergentes, inversión, apertura económica.

### Introducción

El objetivo del presente documento es analizar el proceso de cambio estructural generado por la apertura económica, mayor participación de la inversión extranjera y las inversiones públicas y privadas en los países emergentes, concentrándonos en los casos de México y Ecuador. Este análisis se centra en identificar cómo estas economías han enfrentado transformaciones en sus estructuras productivas, evaluando los factores que han impulsado, detenido o distorsionado dichas transformaciones hacia actividades económicas que no necesariamente favorecen el desarrollo sostenible.

La época actual requiere de un reordenamiento de los modelos económicos y de las normas sociopolíticas que incumplieron con los propósitos de mejorar el bienestar de la población, a través de un crecimiento sostenido con

### Abstract

This paper seeks to analyze the process of structural change generated by Foreign Direct Investment (FDI), domestic investment and economic liberalization in two emerging countries, Mexico and Ecuador. The results indicate that in both countries there have been changes in their productive structures in the first decade of the 21st century, caused by different factors. In Ecuador, trade openness and private investment have been important elements for structural change, while in Mexico structural change has also been influenced by FDI and public investment.

**Keywords:** structural change, emerging economies, investment, trade liberalization.

un cambio estructural y mejor distribución del ingreso. En América Latina y el Caribe, la tasa de crecimiento entre 1960 y 2020 fue de 3.4% a precios constantes de 2010, cercano a lo registrado en Ecuador y México, considerando que el PIB de ambos países creció 3.6% en ese mismo periodo. No obstante, la década de 1980 significó el inicio del deterioro de la economía para ambos países, principalmente en la década de 1990, cuando la economía ecuatoriana creció 2.3%, mientras que en la primera década del siglo XXI la economía mexicana registró un crecimiento de 1.8% (Banco Mundial [BM], 2021a).

En este periodo de políticas neoliberales, la apertura económica y la aplicación de las ideas de libre mercado se tradujeron en una mayor participación de las economías emergentes en el mercado internacional a

través de exportaciones con bajo contenido tecnológico, pero fundamentalmente consolidando una estructura productiva con alta dependencia de las importaciones, y particularmente de insumos intermedios, lo que ha repercutido en el crecimiento de la productividad laboral, de la economía en su conjunto (Thirlwall, 1983; 2002), y en el bienestar de la población.

Esta globalización ha acelerado la transferencia de la manufactura de las economías avanzadas hacia algunas economías en desarrollo y las cadenas de valor mundiales han resultado ser deficientes para crear empleos que aseguren el bienestar de la población, debido a su papel de conductores de tecnologías intensivas en habilidades y capital, su modelo de negocio basado en insumos importados, y la falta de integración con la economía local (Badillo y Roza, 2019; Rodrik, 2021).

Aunque las políticas económicas encaminadas hacia la inserción a las Cadenas Globales de Valor generaron inicialmente una rápida transformación de la estructura productiva, en el largo plazo se ha producido un estancamiento de la transformación productiva, y con ello del crecimiento económico, debido a que se abandonó por muchos años la política industrial con el lema de que “la mejor política industrial era no hacer política industrial.”

Asociado a ello, este fenómeno de apertura económica ha significado también un crecimiento de la Inversión Extranjera Directa (IED) e Indirecta (IEI), las cuales se han utilizado como mecanismos para financiar los déficits fiscales y en cuenta corriente (Banco Central del Ecuador [BCE], 2010; CEPAL, 2015; Blancas, 2015), lo que ha implicado que una proporción significativa del excedente económico generado internamente se desplace al exterior a través de la fuga de capitales (Blancas, 2015), remisión de utilidades, pago de intereses por servicio de la deuda y saldos negativos en la balanza en cuenta corriente.

Recientemente, ha resurgido el interés por la política industrial acompañado de una alta participación del Estado para fomentar el cambio estructural y el desarrollo económico de los países, considerando que el impulso de nuevas industrias requiere de la participación gubernamental (Aiginger y Rodrik, 2020). Asimismo, ha reaparecido el interés particular por las estrategias de política económica y las ideas sobre la industrialización para fomentar el desarrollo económico de Hamilton (1791) y List (1909) de finales del siglo XVIII y principios del siglo XX (Ocampo, 2005; Suarez-Dávila, 2019; Blancas y Aliphat, 2021).

Efectivamente, América Latina no ha sido ajeno a los efectos de la falta o ineficientes políticas industriales

que finalmente no tuvieron el resultado esperado. El notable crecimiento registrado durante la etapa de industrialización dirigida por el Estado obedeció a una estrategia de cambio estructural basada originalmente en la sustitución de importaciones, incorporando progresivamente elementos “mixtos” que combinaban la sustitución de importaciones con el fomento de las exportaciones (Cárdenas *et al.*, 2000).

No obstante, las instituciones públicas y privadas se debilitaron, caracterizando la “década perdida” de los años ochenta, y continuó paulatinamente su descenso en los años noventa, por lo que la insuficiente creación de instituciones orientadas hacia el desarrollo productivo se ha convertido en una deficiencia latente que afecta el crecimiento económico (Chang, 2002; Ocampo, 2005), y en un sentido más amplio el bienestar de la población (Acemoglu y Robinson, 2013).

## Las similitudes y diferencias de las economías latinoamericanas: México y Ecuador

México y Ecuador comparten características clave que los convierten en casos relevantes para analizar procesos de cambio estructural en economías emergentes. Ambos países, ubicados en América Latina, han enfrentado transiciones importantes en sus estructuras económicas. En México, la industrialización promovida por el modelo de sustitución de importaciones (1940-1982) dio paso a una apertura comercial acelerada con la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, transformando su estructura productiva hacia un modelo exportador (Cárdenas, 1987; Rouquié y Ramos, 2015). Ecuador, por su parte, experimentó una fuerte reconfiguración económica con la dolarización en el año 2000, seguida de un auge petrolero en la década de 2000 que impulsó el crecimiento, pero también reforzó la dependencia del sector extractivo (Beckerman y Solimano, 2002; Acosta, 2006).

Desde mediados del siglo XX, México inició un proceso de industrialización basado en la sustitución de importaciones, consolidándose como una economía manufacturera orientada a las exportaciones, especialmente después de la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 (Moreno-Brid *et al.*, 2014). Por otro lado, Ecuador, cuya economía ha estado históricamente basada en la explotación de recursos naturales como petróleo y banano, adoptó la dolarización en el año 2000 como respuesta a una crisis económica severa, lo que trajo

estabilidad monetaria a costa de una mayor dependencia de las condiciones del comercio internacional (Urdaneta *et al.*, 2024).

En términos de estructura productiva, México se destaca por su integración en las cadenas globales de valor, especialmente en sectores como la industria automotriz y electrónica. Sin embargo, esta integración ha estado asociada a una alta dependencia de las importaciones de insumos intermedios y tecnología (Rodrik, 2021). Por su parte, Ecuador ha mostrado una menor diversificación productiva, manteniendo una alta dependencia de la exportación de bienes primarios, lo que lo hace más vulnerable a las fluctuaciones de precios internacionales (CEPAL, 2019).

Comparativamente, entre 2000 y 2020, el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita de México creció en promedio un 1.2% anual, mientras que en Ecuador el crecimiento fue del 2.1% anual. Esta diferencia refleja la influencia de las políticas económicas adoptadas en cada país, así como sus capacidades institucionales y productivas (Banco Mundial, 2021b). No obstante, ambos países enfrentan desafíos comunes, como la falta de una política industrial efectiva y el rezago en la innovación tecnológica.

La elección de México y Ecuador para este análisis se justifica por las similitudes en sus trayectorias económicas recientes y por las diferencias en sus enfoques de política económica. México, con su modelo de apertura comercial intensiva y orientación exportadora, y Ecuador, con su economía dolarizada y dependiente de recursos naturales, ofrecen una perspectiva contrastante para estudiar cómo diferentes estrategias pueden influir en los procesos de cambio estructural y desarrollo económico.

El estudio se organiza en cinco secciones. La primera contextualiza el cambio estructural en América Latina, resaltando los factores que han influido en la transformación económica de México y Ecuador. La segunda examina los hechos estilizados sobre estructura productiva, inversión extranjera, inversión nacional y apertura comercial como motores del cambio estructural. La tercera detalla la metodología, incluyendo las variables económicas analizadas y los métodos econométricos utilizados. La cuarta sección presenta los resultados del análisis econométrico, comparando la evolución del Valor Agregado Bruto (VAB), la Inversión Extranjera Directa (IED), la Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) y el Índice de Apertura Comercial (IAC) en ambos países, además de discutir sus implicaciones en el desarrollo económico. Finalmente, se exponen las conclusiones.

## La estructura productiva, la apertura económica y la inversión en México y Ecuador

### Valor agregado, estructura productiva y apertura comercial

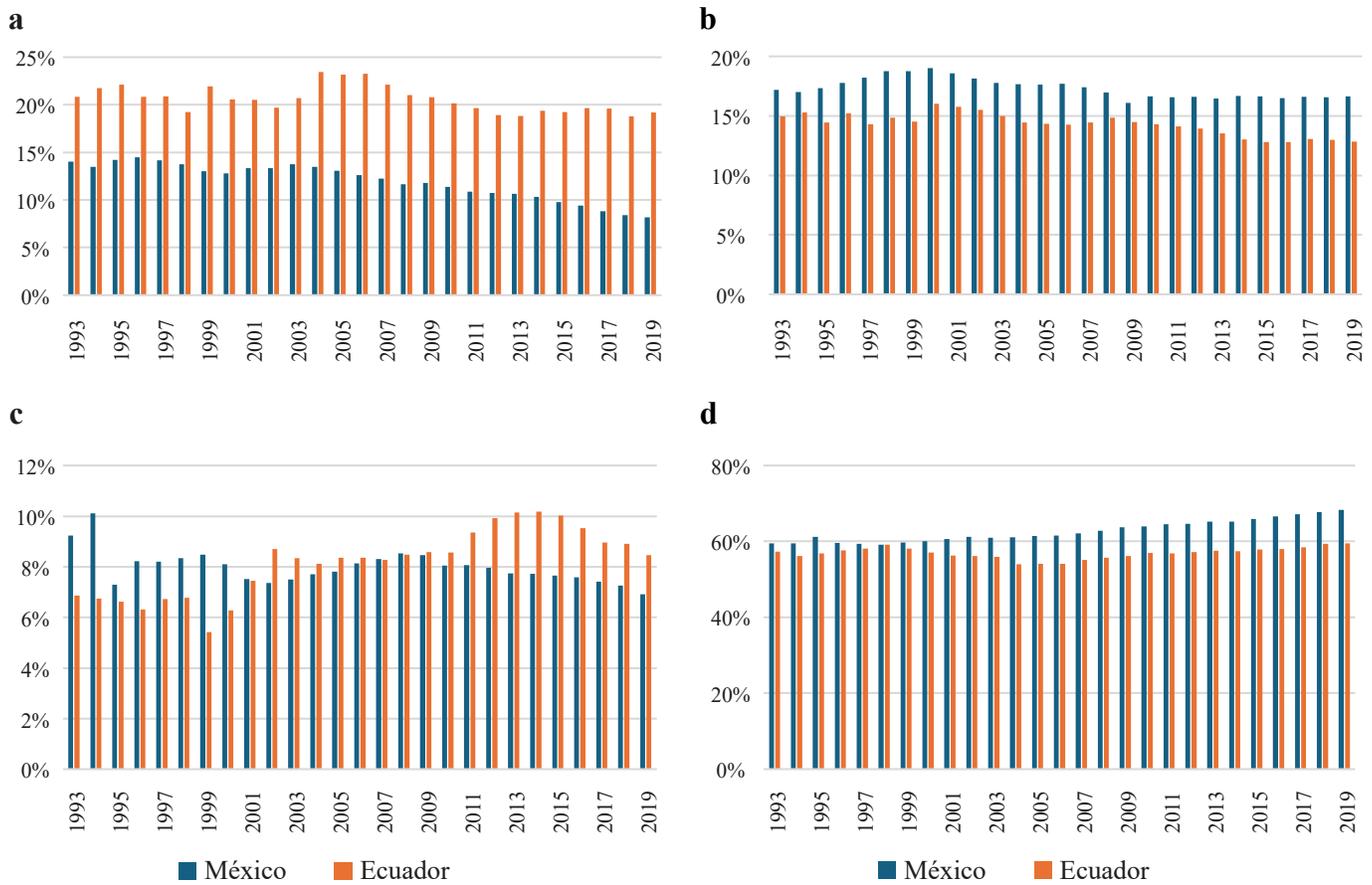
Los países latinoamericanos no han logrado diversificar sus exportaciones hacia productos tecnológicos. En Ecuador este fenómeno se refleja en la “terciarización” de la producción y la “reprimarización” de la economía (CEPAL, 2015); mientras que, en México, su estructura productiva se ha integrado en las Cadenas Globales de Valor, principalmente en la industria automotriz y actividades maquiladoras ligadas a la IED (Badillo y Roza, 2019), pero mantiene una alta participación del sector servicios en el Valor Agregado Bruto (**Figura 1**).

México y Ecuador ilustran un proceso de desindustrialización caracterizado por la reducción del producto manufacturero como proporción del PIB (Tregenna, 2009) y del empleo total (Rowthorn y Ramaswamy, 1999; Palma, 2005). Aunque en ambos países el sector servicios tiene una alta participación, su evolución ha sido distinta. En México, este sector ha mostrado un crecimiento sostenido, alcanzando cerca del 70.0% del Valor Agregado Bruto (VAB) en 2019. En Ecuador, por el contrario, ha experimentado fluctuaciones, pasando del 58.0% en 1998 al 53.0% en 2007, y situándose en aproximadamente 56.0% en 2019 (**Figura 1**).

El sector industrial ha perdido participación en el VAB en ambos países, pero con diferencias significativas. En Ecuador, la caída ha sido más marcada, con una disminución de 3.0% desde 2002. No obstante, esta reducción ha sido compensada por el crecimiento de otros sectores, como la extracción de minerales desde 2004 y la construcción desde 2011. En México, aunque la industria manufacturera también ha reducido su participación en el VAB, ha mostrado una leve recuperación desde 2016, situándose en torno al 16.0%-17.0% en los últimos años.

El sector de la construcción ha seguido trayectorias diferentes. En México, su participación en el VAB se ha mantenido relativamente estable, mientras que en Ecuador ha crecido notablemente desde 2011, lo que ha compensado parte de la pérdida de participación del sector industrial.

Las deficiencias estructurales de la economía de ambos países se reflejan en el mercado laboral, especialmente en los altos niveles de informalidad. En México, entre 1992 y 2019, el sector servicios ha absorbido la mayor parte de la fuerza laboral, con un crecimiento sostenido



**Figura 1.** Participación de las actividades productivas en el Valor Agregado Bruto en México (Millones de pesos a precios de 2013) y Ecuador (Millones de USD a precios de 2007) desde 1993 hasta 2019. **a)** Sector Primario, **b)** Sector Industrial, **c)** Construcción, **d)** Sector Servicios. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021a) y Banco Central del Ecuador (BCE, 2021a).

y un promedio de 25.2 millones de trabajadores, seguido por el sector industrial, con 10.9 millones de empleados. En Ecuador, el sector terciario lidera la absorción laboral con 3.1 millones de trabajadores, seguido por el sector agrícola, que emplea a 1.7 millones de personas (OIT, 2021).

La informalidad es una característica estructural tanto en México como en Ecuador, afectando especialmente al sector primario, cuyo empleo informal tiende a aumentar en periodos de estancamiento económico. En México, en el segundo trimestre de 2013, el 20.9% de los ocupados en el sector primario se encontraba en la informalidad, frente al 3.1% en el sector formal. En el sector terciario, el 58.3% de los trabajadores estaban en la informalidad, mientras que el 69.0% se encontraba en la formalidad (INEGI, 2021c). En Ecuador, entre 2007 y 2019, el 93% de los trabajadores del sector primario laboraban en condiciones informales, al igual que aproximadamente el 80% de los empleados en los sectores de construcción y comercio (INEC, 2021).

A pesar de la persistencia de la informalidad en ambos

países, su magnitud varía. En México, cerca del 60.0% de los trabajadores se encontraban en el sector informal (OIT, 2014), mientras que en Ecuador esta proporción fue del 41.6%. Destaca el hecho de que los sectores primario extractivo y terciario presentaban en 2013 una tasa de empleo informal inferior al promedio del país (INEC, 2021).

Los cambios en la estructura productiva de México y Ecuador han tenido un impacto directo en el valor agregado, reflejando la reconfiguración sectorial de ambas economías. En México, el predominio del sector servicios sobre la industria manufacturera ha limitado el crecimiento del valor agregado, dado que las actividades terciarias, aunque generan empleo, suelen tener una menor productividad y encadenamientos productivos en comparación con la manufactura (Baumann y Kritikos, 2016). La desindustrialización ha reducido la capacidad de generación de valor agregado en sectores estratégicos, afectando el desarrollo de tecnologías avanzadas y la diversificación productiva (Tregenna, 2011).

En Ecuador, la creciente participación de la minería y

la construcción en el VAB ha generado incrementos de corto plazo en el valor agregado, pero con efectos limitados en la industrialización y el empleo formal. La alta dependencia de sectores extractivos introduce vulnerabilidades ante fluctuaciones de precios internacionales y restricciones en el desarrollo de encadenamientos productivos internos (Pérez, 2017). A largo plazo, la estructura productiva de Ecuador sigue mostrando una alta concentración en actividades primarias, lo que restringe la expansión del valor agregado y dificulta la transición hacia una economía basada en el conocimiento y la innovación (ECLAC, 2020).

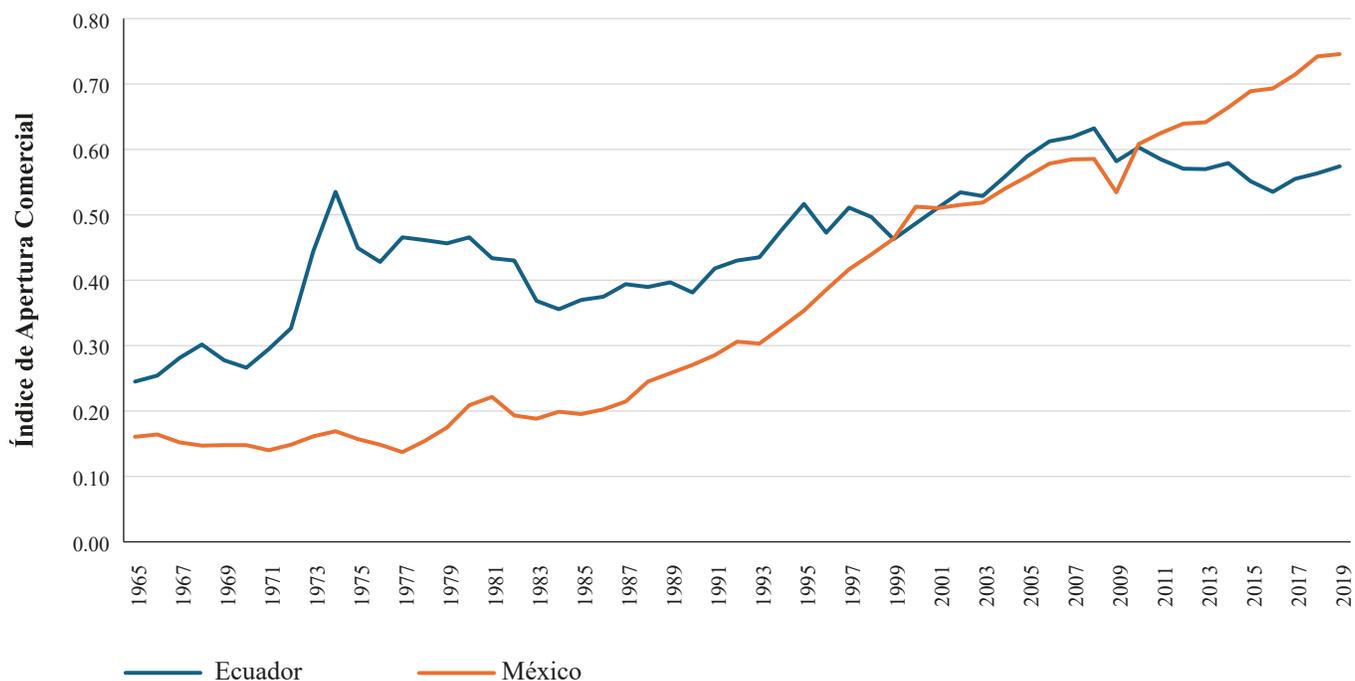
La apertura comercial ha profundizado las estructuras productivas de México y Ecuador. Aunque la globalización puede fomentar el crecimiento económico mediante el fortalecimiento del sector manufacturero y la diversificación hacia bienes tecnológicos (Thirlwall, 1983; 2002; 2019; Cimoli y Porcile, 2015), ambos países latinoamericanos están integrados en las Cadenas Globales de Valor de manera diferenciada. Ecuador se destaca como proveedor de materias primas, mientras que México ensambla bienes terminados con insumos intermedios importados, lo que ha contribuido al deterioro de sus estructuras productivas.

El vínculo de Ecuador y México con la economía global difiere en sus momentos históricos y magnitud de

apertura comercial. Entre 1965 y 1999, Ecuador estuvo más integrado a la economía mundial que México. La década de 1970 fue crucial para Ecuador, marcada por el «boom petrolero», cambios en los sectores productivos y un superávit en la balanza comercial en 1973 debido a su alta participación en la producción y exportaciones mundiales (**Figura 2**) (Oleas, 2013).

En la década de 1970, las actividades extractivas aumentaron su participación en el VAB de Ecuador en un 7.9% en comparación con el periodo de 1965-1969, mientras que los sectores industriales y de servicios experimentaron un crecimiento inferior al 1%. La agricultura, construcción y comercio vieron reducciones en su participación del 3.9%, 1.5% y 2.5%, respectivamente. A partir de 2008, Ecuador adoptó políticas proteccionistas y se centró en el comercio intrarregional, destacándose en 2017 con acuerdos comerciales con la Unión Europea, la Comunidad Andina de Naciones, y acuerdos parciales con México, Chile y MERCOSUR (Alvarado, 2019).

La economía mexicana mantuvo una apertura comercial constante hasta 1977, aumentando su índice de 0.14 a 0.75 en 2019. A pesar de su importante incorporación a la globalización, los años 1993 y 1994 fueron cruciales para su integración global, con un aumento sostenido del índice debido a las importaciones, excepto en 2009



**Figura 2.** Índice de apertura comercial de Ecuador y México desde 1965 hasta 2019.

Nota: El índice de apertura comercial es la razón entre la adición de importaciones y exportaciones, con respecto al PIB en US\$ a precios constantes de 2010. Fuente: Banco Mundial (BM, 2021b y 2021c).

cuando la crisis mundial afectó gravemente a México por su cercanía geográfica y dependencia económica (**Figura 2**).

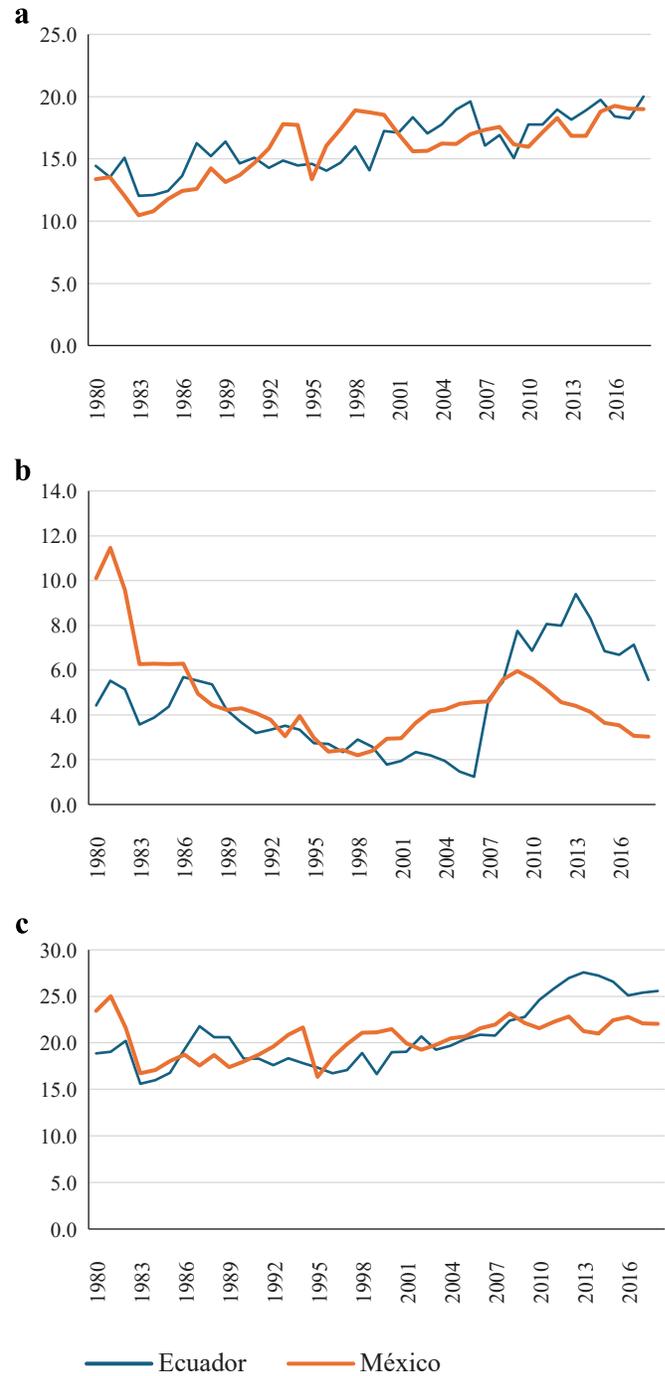
Un aspecto notable en la evolución del comercio de ambos países es la convergencia en el índice de apertura comercial alrededor del año 2001. Hasta finales de la década de 1990, Ecuador mantenía un nivel de apertura mayor, pero desde principios del siglo XXI, México experimentó un crecimiento acelerado en su integración comercial, impulsado por el fortalecimiento de su participación en cadenas globales de valor y los efectos acumulativos del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Mientras que Ecuador mostró una tendencia relativamente estable en su grado de apertura desde finales de la década de 1990, en México se observó una expansión sostenida, superando a Ecuador a partir de 2001. Este cambio marca un punto de inflexión en la dinámica comercial de ambos países, reflejando la transición de México hacia una economía más abierta y dependiente del comercio exterior, mientras que Ecuador mantuvo un esquema más tradicional basado en la exportación de bienes primarios.

A pesar del fuerte vínculo que México desarrolló en la década de 1990 con el Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, y que Ecuador estableció en la década de 1970 con la extracción y comercialización de petróleo, ambos países han enfrentado persistentes déficits en la balanza comercial desde 1965. Este déficit se debe principalmente al exceso de importaciones de bienes de uso intermedio (INEGI, 2021b; BCE, 2021b).

### La inversión nacional y extranjera en los sectores productivos

A lo largo del período 1980-2008, México mantuvo una mayor Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) como porcentaje del PIB en comparación con Ecuador, con algunas excepciones puntuales (**Figura 3**). En ambos países, la inversión en capital fijo ha estado dominada por el sector privado, pero el papel del sector público ha sido un factor diferenciador clave en sus trayectorias económicas.

En Ecuador, la inversión pública tuvo un punto de inflexión en 2007, cuando su participación en la FBCF creció notablemente tras años de baja inversión estatal. Como se observa en la **Figura 3** (Sector Público), la FBCF del sector público en Ecuador aumentó de manera significativa, mientras que en México continuó su tendencia a la baja. Este cambio en Ecuador estuvo impulsado por una estrategia económica heterodoxa que pro-



**Figura 3.** Formación Bruta de Capital Fijo como porcentaje del PIB en México y Ecuador desde 1980 hasta 2018. a) Sector Privado, b) Sector Público, c) Total. Fuente: Banco Mundial (2021d).

movió una mayor intervención estatal, especialmente en infraestructura, bienes metálicos, maquinaria y equipo, generando una competencia directa con la inversión privada (BCE, 2021c).

Por el contrario, en México, la participación del sector público en la formación de capital fijo se redujo drásticamente desde 2009, dejando al sector privado como el principal motor de la inversión en áreas

clave como energía eléctrica, minería e industrias manufactureras. La **Figura 3** (Sector Público) muestra una caída sostenida de la inversión pública mexicana, mientras que Ecuador experimentó un incremento a partir de 2007. Como resultado, a partir de ese año, Ecuador superó a México en términos de inversión pública como porcentaje del PIB.

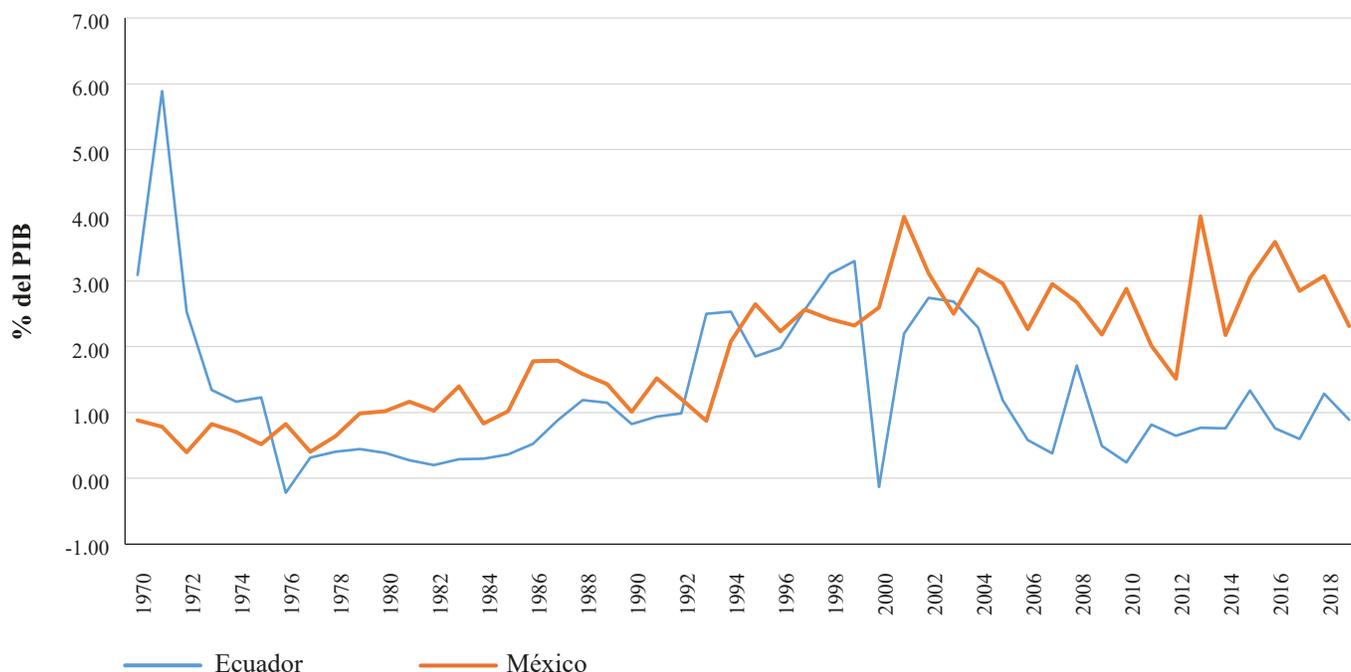
En términos globales, la **Figura 3** (Total) muestra que, si bien México mantuvo una tendencia estable en la FBCF total, Ecuador registró un crecimiento más dinámico en la última década del período analizado, impulsado principalmente por la inversión estatal. Esto evidencia la divergencia en los modelos económicos seguidos por ambos países: mientras Ecuador apostó por una mayor intervención pública, México dejó el crecimiento de la inversión en manos del sector privado.

En México, la Inversión Extranjera Directa (IED) ha mostrado un crecimiento sostenido desde 1993, aunque de manera moderada, consolidando una brecha significativa respecto a Ecuador, especialmente a partir del año 2000. En contraste, Ecuador experimentó una caída del 13.0% en la IED durante el 2000, alcanzando su nivel más bajo desde 1980. Este descenso estuvo relacionado con la inestabilidad económica, financiera, política y social derivada de la crisis de 1999 y la posterior dolarización en 2000, lo que resultó en un crecimiento real negativo del PIB de -4.7% en 1999, afectando a todos los sectores productivos, excepto el primario (BCE, 2021a) (**Figura 4**).

Uno de los factores clave en la consolidación de la IED en México ha sido el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), que aceleró su integración a la economía global. Como se observa en la **Figura 4**, las inversiones extranjeras directas aumentaron del 0.88% del PIB en 1993 al 2.65% en 2001. A pesar de ciertas fluctuaciones, desde el año 2000, la IED en México se ha mantenido entre el 2.0% y 3.0% del PIB, en línea con el promedio regional de América Latina y el Caribe (3.5%). Este flujo de capital ha sido clave para equilibrar los déficits de la cuenta corriente y ha impulsado sectores estratégicos como el automotriz y electrónico (Dussel, 2000).

No obstante, las inversiones extranjeras en México han tenido un doble efecto. Si bien han contribuido a la estabilidad macroeconómica y han financiado el modelo de crecimiento basado en exportaciones implementado desde 1988, no han fortalecido los encadenamientos productivos ni la integración regional. Además, su impacto en el empleo, el financiamiento y la sustentabilidad económica ha sido limitado. La industrialización en México ha sido liderada mayoritariamente por empresas transnacionales estadounidenses, cuya modernización ha sido facilitada por la IED, sin un desarrollo equitativo de la industria nacional (Chiatchoua *et al.*, 2016; Dussel, 2000).

En Ecuador, la evolución de la IED ha sido más errática, con valores fluctuantes entre 0.24% y 1.71% del PIB desde 2007 (**Figura 4**). Este comportamiento se



**Figura 4.** Inversión Extranjera Directa como porcentaje del PIB en México y Ecuador desde 1970 hasta 2018. Fuente: Banco Mundial (2021e).

debe a varios factores estructurales, como la falta de diversificación económica, deficiencias en infraestructura, limitaciones en el talento humano y una actividad emprendedora incipiente en el sector privado (Gutman *et al.*, 2016). A nivel de política económica, este desempeño se ha vinculado a las medidas proteccionistas implementadas desde 2007, que regulan la IED como un complemento a la inversión nacional y la subordinan a objetivos de transformación y diversificación productiva (Manami, 2013; Gutman *et al.*, 2016).

Adicionalmente, en Ecuador, la inversión extranjera se ha concentrado principalmente en el sector primario extractivo, pero su crecimiento se ha visto afectado por un entorno económico desfavorable. Como se refleja en la **Figura 4**, desde 2014, la IED ha sufrido una ralentización debido a factores como la apreciación del dólar, la caída del precio del petróleo y la reducción de ingresos por exportaciones. La situación se agravó en 2016, cuando el terremoto de magnitud 7.8 golpeó la economía ecuatoriana, exacerbando la caída de la inversión extranjera (BCE, 2016).

## Metodología

Este estudio selecciona las economías de Ecuador y México, debido a sus características distintivas en términos de estructura económica, políticas monetarias, y fuentes de inversión. Aunque estos países no son representativos de todas las economías emergentes, proporcionan un marco útil para explorar el proceso de cambio estructural en economías con diferentes grados de diversificación y dependencia de recursos naturales.

Ambos países son economías emergentes que han experimentado cambios significativos en sus estructuras productivas en la primera década del siglo XXI, influenciados por la IED y la apertura económica. Ecuador, con su economía menos diversificada y su fuerte dependencia del petróleo; contrasta con México, que tiene una economía más diversificada y una integración más profunda con la economía global, especialmente a través de su relación con Estados Unidos.

La selección de las variables utilizadas en este estudio responde al objetivo de analizar el cambio estructural en las economías de México y Ecuador, centrándose en los factores que han influido en las transformaciones productivas de ambas naciones y América Latina. Como variable dependiente, el Valor Agregado Bruto (VAB) permite capturar la evolución de la actividad económica y refleja el desempeño estructural de las economías en términos productivos. Por su parte, las variables independientes —Inversión Extranjera Directa (IED),

Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) pública y privada como porcentaje del PIB, e Índice de Apertura Comercial (IAC)— son representativas de las principales fuerzas impulsoras del cambio estructural en economías emergentes.

La IED ha sido identificada como un motor clave para la transferencia tecnológica y el incremento de la productividad, favoreciendo la reestructuración de sectores productivos en economías en desarrollo (Dunning, 1981; Borensztein *et al.*, 1998). La FBCF, tanto pública como privada, es fundamental para consolidar la capacidad productiva y fomentar el crecimiento económico de largo plazo, especialmente en países con economías en transición (Solow, 1956; De Long y Summers, 1991). Asimismo, el Índice de Apertura Comercial (IAC) refleja el grado de integración económica y la capacidad de adaptación al comercio global, factores esenciales para el cambio estructural en contextos de liberalización económica (Balassa, 1985; Edwards, 1993). Estas variables permiten examinar el impacto de la apertura económica, la inversión pública y privada, y los flujos internacionales de capital, que han sido identificados como factores clave en la literatura sobre desarrollo económico y transformación productiva.

## Datos y método de estimación

En este documento se considera que el cambio estructural en una serie de tiempo se presenta cuando hay modificaciones instantáneas o permanentes, invariables e inesperadas en uno o más componentes estructurales, debido a eventos específicos (Hendry y Clements 2001; Rodríguez, 2002).

Con la finalidad de identificar cambios estructurales en las economías de México y Ecuador, se analizaron comparativamente la evolución de las series de tiempo disponibles de Valor Agregado Bruto (VAB), Índice de Apertura Comercial (IAC), Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) del sector público y privado, e Inversión Extranjera Directa (IED), desde 1980 hasta 2018. Dicha información estadística proviene del Banco Mundial, Banco Central del Ecuador, e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México.

Con estas variables se realizaron modelaciones econométricas lineales estimadas por Mínimos Cuadrados Ordinarios, a través de las cuales se busca identificar los cambios estructurales múltiples, que se producen en fechas desconocidas. El proceso de detección de cambio estructural involucró el uso de variables dicótomas de forma aditiva y multiplicativa, debido a que permiten diferenciar entre los interceptos, y los coeficientes de las

pendientes entre los periodos de cambio estructural, es decir identifican el origen de las diferencias entre regresiones. Adicionalmente, las variables dicotómicas son una herramienta flexible para analizar diversos problemas económicos, entre ellos los efectos de política económica que afectan la dinámica económica en su conjunto (Alesina y Perotti, 1996; Ramey y Shapiro, 1998; Jordà y Taylor, 2016).

Considerando el periodo de tiempo desde 1980 hasta 2018, y que los eventos de política económica y sus efectos en el VAB, IED, IAC y FBCF pueden ser múltiples, para la detección de puntos de cambio se recurrió a las herramientas visuales de gráficos CUSUM y CUSUMQ (Brown *et al.*, 1975), así como a tests específicos como la prueba de CHOW, cuya hipótesis nula asegura la estabilidad de los parámetros (Chow, 1960; Andrews, 1993; Bai y Perron, 1998; Zeileis *et al.*, 2005).

A partir de los resultados gráficos y la prueba de CHOW, se prosiguió con la modelación econométrica para ambos países, cuya variable endógena es el VAB en millones de pesos a precios de 2013 y millones de USD a precios de 2007 para las economías de México y Ecuador, respectivamente; mientras que las variables exógenas son: IED, FBCF público y privada como porcentaje del PIB, IAC, y las variables dicotómicas.

La forma genérica de la modelación se presenta a continuación:

$$VAB_t = \beta_0 + \beta_1 IED_t + \beta_2 FBCF_{pub}_t + \beta_3 FBCF_{prv}_t + \beta_4 IAC_t + \sum_{j=1}^m \delta_j D_{jt} + \sum_{j=1}^m \gamma_j (D_{jt} \cdot X_{jt}) + \epsilon_t \quad (1)$$

Donde:

$VAB_t$ : Variable endógena, representa el Valor Agregado Bruto en el período  $t$ .

$IED_t$ : Inversión Extranjera Directa como porcentaje del PIB en el período  $t$ .

$FBCF_{pub}_t$ : Formación Bruta de Capital Fijo del sector público como porcentaje del PIB en el período  $t$ .

$FBCF_{prv}_t$ : Formación Bruta de Capital Fijo del sector privado como porcentaje del PIB en el período  $t$ .

$IAC_t$ : Índice de Apertura Comercial en el período  $t$ .

$\sum_{j=1}^m \delta_j D_{jt}$ : Variables dicotómicas ( $D_{jt}$ ) que identifican los periodos de cambio estructural, afectando el intercepto.

$D_{jt} = 1$  si el período  $t$  pertenece al régimen  $j$ , 0 en caso contrario.

$\sum_{j=1}^m \gamma_j (D_{jt} \cdot X_{jt})$ : Interacción entre las variables dicotómicas y las variables explicativas ( $X_{jt}$ ), permitiendo diferencias en las pendientes entre los periodos de cambio estructural.

$\epsilon_t$ : Término de error estocástico, que captura las influencias no modeladas.

Las variables dicotómicas son flexibles y se adaptan al número de puntos de cambio estructural detectados ( $m$ ) en los análisis gráficos (CUSUM, CUSUMQ) o por la prueba de CHOW.

## Resultados y discusión

El estudio del comportamiento de los agregados económicos relacionados con la Inversión Extranjera Directa (IED), la apertura comercial, las inversiones públicas y privadas, y la estructura productiva en términos de Valor Agregado Bruto (VAB) en México y Ecuador desde 1980 hasta 2018 es crucial. La modelación econométrica sugiere que la alta integración en las Cadenas Globales de Valor (CGV) y la falta de coordinación en las políticas económicas han impactado negativamente el cambio estructural de la producción, revelando diferencias significativas entre ambos países.

## México

En el caso de México, se identificó un período de cambio estructural entre 2002 y 2012, durante el cual las inversiones y la apertura comercial generaron efectos diferenciados en el Valor Agregado Bruto, como se resume en la **Tabla 1**.

Durante este lapso, las variables mostraron un cambio estructural en el VAB, lo que sugiere una modificación en el comportamiento de las inversiones y la apertura comercial. Aunque todas las variables presentaron cambios en la magnitud de sus parámetros, es relevante destacar que la IED, así como las inversiones públicas y privadas, alteraron su significancia dentro del modelo.

La Inversión Extranjera Directa en México ha mostrado un impacto negativo en la generación de valor agregado antes, durante y después del período 2002-2012. Sin embargo, durante este período de cambio estructural

**Tabla 1.** Resultados de la modelación econométrica 1980 – 2018 para la economía de México.

| Variable endógena: VAB (en millones de pesos a precios de 2018) |                         |                |           |              |                |           |
|---|-------------------------|----------------|-----------|--------------|----------------|-----------|
| Variables exógenas  | 1980 – 2001/2013 - 2018 |                |           | 2002 - 2012  |                |           |
|   | Coefficiente            | Error Estándar | t         | Coefficiente | Error Estándar | t         |
| C   | 2161564                 | 669673.6       | 3.227787  | -7286430     | 3110356        | -2.342636 |
| IAC   | 21885279                | 514739.6       | 42.51719  | -8368442     | 2584739        | -3.237636 |
| IED   | -326359.9               | 111817.7       | -2.918677 | 95253.40     | 263572.4       | 0.361394* |
| FBCFSPub  | 15250.38                | 35428.81       | 0.430452* | 413870.1     | 158843.2       | 2.605527  |
| FBCFSPr   | 23536.27                | 39031.40       | 0.603009* | 491025.1     | 195463.2       | 2.512110  |

\* p valores mayores que 5%. En los demás casos los valores fueron significativos.

IAC: Índice Apertura Comercial

IED: Inversión Extranjera Directa como porcentaje del PIB

FBCFSPub: Formación Bruta de Capital Fijo del Sector Público como porcentaje del PIB

FBCFSPr: Formación Bruta de Capital Fijo del Sector Público como porcentaje del PIB

ral, la IED perdió significancia, lo que indica que no logró impulsar el crecimiento del VAB en ese intervalo. Este resultado concuerda con la evolución de la IED a partir del año 2000, cuando experimentó una desaceleración, promediando un 2.6% del PIB, destacándose la reducción de nuevas inversiones en comparación con el incremento gradual de las utilidades reinvertidas desde 1980 (Banco de México, 2021).

Los efectos sectoriales poco favorables de la IED en México han generado distorsiones en la estructura económica (Moreno y Moguel, 1989), a pesar de las reformas dirigidas a atraer mayor inversión extranjera. Estas modificaciones han intensificado las desigualdades en el desarrollo regional (De la Mora Sánchez, 2017) y han afectado el empleo, ya que un número reducido de empresas extranjeras, intensivas en capital y con un alto grado de comercio intraindustrial, generan relativamente pocos puestos de trabajo (Dussel, 2000; Chiatchoua, Neme y Valderrama, 2016).

Entre 2002 y 2012, las inversiones externas perdieron relevancia en la generación de valor agregado en México, mientras que la inversión pública y privada contribuyeron significativamente al crecimiento del VAB. Es notable que el efecto de la FBCF privada fue superior, lo que refleja la preeminencia de esta en la formación de capital en las economías latinoamericanas, donde su participación supera ampliamente a la de la FBCF pública. En México, tras un incremento en la FBCF pública en 2000, se observó un crecimiento significativo en 2009, seguido de una tendencia decreciente. Por su parte, la FBCF privada ha mostrado una trayectoria más moderada, con importantes reducciones entre 2008 y 2015 (Banco de México, 2021).

En cuanto a la relación entre los sectores público y privado en la promoción de la inversión, se identificó una correlación negativa (-0.597) entre ambas variables, lo que sugiere un efecto de desplazamiento de la inversión privada por la pública. No obstante, la inversión privada muestra una correlación positiva significativa con la IED ( $r=0.61$ ), lo que respalda las predicciones de la escuela neoclásica. Sin embargo, estudios específicos han demostrado que este efecto de *crowding out* es visible en el corto plazo, mientras que en el largo plazo existe una complementariedad entre ambas formas de inversión (Castillo y Herrera, 2005; Fonseca, 2009).

A pesar de la falta de articulación entre las inversiones, los resultados econométricos indican que estas generaron un efecto positivo y significativo en el VAB mexicano entre 2002 y 2012. Sin embargo, el crecimiento del VAB en los sectores productivos fue menor, destacándose el sector secundario con una tasa de crecimiento del 1.2%, comparada con el 2.3% registrado entre 1980 y 2001.

Otro factor clave en el proceso de cambio estructural ha sido la apertura comercial, cuyo impacto ha sido significativo desde 1980. No obstante, entre 2002 y 2012, su efecto en el VAB mexicano fue negativo, mientras que en los periodos 1980-2001 y 2013-2018 su relación con el VAB fue positiva. A pesar de que la apertura comercial en México mantuvo una tendencia creciente desde 1987, se observó un estancamiento entre 2000 y 2002. Posteriormente, entre 2002 y 2014, el índice de apertura comercial retomó su tendencia creciente, impulsado por los déficits en la cuenta comercial asociados al alto contenido de importaciones de bienes intermedios.

Este fenómeno ha impactado la balanza de pagos de México y la región, dado que el financiamiento de la

cuenta corriente mediante la IED puede resultar contra-productiva a largo plazo. Esto se debe a que la salida de utilidades supera la entrada de capitales (CEPAL, 2015).

## Ecuador

En la economía ecuatoriana la dinámica de la apertura comercial, la IED y las inversiones públicas y privadas difieren de los resultados encontrados en la economía de México para el mismo periodo de tiempo 1980 - 2018.

Los resultados de la modelación econométrica sobre el cambio estructural en Ecuador evidencian dos periodos en los cuales las políticas económicas transformaron la estructura productiva en términos del Valor Agregado Bruto (VAB) (**Tabla 2**). Sin embargo, existe una coincidencia en la temporalidad de este cambio estructural entre Ecuador y México. En el caso mexicano, la transformación tuvo lugar entre 2002 y 2012, mientras que en Ecuador ocurrió un año antes, es decir, entre 2001 y 2011. Esta diferencia temporal se relaciona con la dolarización de la economía ecuatoriana en el año 2000 y su efecto tardío en los principales agregados económicos.

Durante el período 2001-2011, la participación sectorial en el VAB mostró un crecimiento en las actividades del sector primario extractivo y agrícola, así como en la construcción e industrias manufactureras. En contraste, la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, el suministro de agua y gas, y el sector servicios redujeron su contribución al VAB en comparación con los promedios observados en los periodos 1980-2000 y 2012-2018 (**Figura 1**).

A pesar del incremento sustancial de la Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) del sector público, especialmente en el sector de la construcción a partir de 2008, este no generó un impacto significativo en el VAB ecuatoriano, en contraste con la dinámica más compleja

observada en la economía mexicana. Un fenómeno similar se presentó con la Inversión Extranjera Directa (IED) en Ecuador, la cual resultó no significativa dentro del modelo. Esta situación es comparable a la de México en su período de cambio estructural (2002-2012), con la diferencia de que en México la IED desempeñó un papel clave en la evolución del VAB entre 1991-2001 y 2013-2018.

No obstante, la apertura comercial y las inversiones privadas han sido factores determinantes en la evolución del VAB ecuatoriano. Durante los periodos 1991-2000 y 2012-2018, tanto el Índice de Apertura Comercial (IAC) como las inversiones privadas influyeron positivamente en el VAB. En particular, un aumento del 1% en la inversión privada como porcentaje del PIB elevó el VAB en un 0.17%, mientras que un incremento del 1% en el IAC—ya sea por el crecimiento de las importaciones o exportaciones—generó un aumento del 3.1% en el VAB.

Sin embargo, estas relaciones cambiaron en el período 2001-2011. En este intervalo, un aumento del 1% en la inversión privada redujo el VAB en un -0.2%, mientras que el IAC dejó de ser una variable significativa en la dinámica del VAB ecuatoriano. La FBCF total como porcentaje del PIB, conformada principalmente por inversión privada, se redujo en los sectores más dinámicos de la economía, como las industrias manufactureras y la agricultura—donde aproximadamente el 30% de la fuerza laboral está empleada (OIT, 2021)—, mientras que aumentó en sectores como la minería, la construcción y los servicios. Este comportamiento evidencia una reasignación del capital hacia sectores de alta intensidad de capital, como la minería, y de baja productividad, como la construcción y los servicios.

En Ecuador, la apertura comercial no tuvo un impacto significativo en el VAB durante el período 2001-2011. No obstante, desde 2008, la balanza comercial experimentó un cambio abrupto, manteniéndose en déficit hasta 2015,

**Tabla 2.** Resultados de la modelación econométrica 1980 – 2018 para la economía ecuatoriana.

| Variable endógena: Log(VAB) (en millones de USD a precios de 2007) |                         |                |           |             |                |            |
|--|-------------------------|----------------|-----------|-------------|----------------|------------|
| Variables exógenas   | 1980 – 2000/2012 - 2018 |                |           | 2001 - 2011 |                |            |
|  | Coficiente              | Error Estándar | t         | Coficiente  | Error Estándar | t          |
| C  | 12.82185                | 0.429055       | 29.88393  | 3.436364    | 1.469784       | 0.0256     |
| IAC  | 3.108244                | 0.770724       | 4.032889  | -0.235980   | 1.376718       | -0.171408* |
| FBCFSPr  | 0.171162                | 0.081990       | -2.590042 | -0.212358   | 0.081990       | -2.590042  |

\* p valores mayores que 5%. En los demás casos los valores fueron significativos.

IAC: Índice Apertura Comercial

FBCFSPr: Formación Bruta de Capital Fijo del Sector Público como porcentaje del PIB

especialmente por el saldo negativo de la balanza no petrolera (Alvarado, 2014). El crecimiento acelerado de las importaciones de materias primas, bienes de capital y bienes de consumo a partir del año 2000 contribuyó al déficit (BCE, 2021b). Este fenómeno contrasta con economías más grandes, como la mexicana, donde la demanda de bienes de consumo superó a la de bienes de capital desde 2005 (INEGI, 2021).

Además, el déficit de la balanza comercial no petrolera en Ecuador se ha visto influenciado por el encarecimiento de las importaciones, impulsado por la depreciación del tipo de cambio real y la volatilidad de los precios del petróleo (Alvarado, 2014). Esto refleja una creciente heterogeneidad estructural, atribuida al limitado desarrollo de economías de aglomeración y especialización (Ocampo, 2005).

## Evidencias del cambio estructural en México y Ecuador: análisis comparativo con estudios previos

Los resultados del estudio revisado sobre la modelación econométrica en México y Ecuador muestran patrones que coinciden en gran medida con la literatura académica sobre cambio estructural, Inversión Extranjera Directa (IED), inversión nacional y apertura comercial en América Latina. Diversos estudios han analizado cómo estos factores han afectado el desarrollo económico de la región, resaltando similitudes y diferencias en las trayectorias de los países.

En cuanto al cambio estructural y el Valor Agregado Bruto (VAB), el estudio revisado concluye que México y Ecuador experimentaron transformaciones en sus economías a partir de la primera década del siglo XXI, con impactos diferenciados por sector. Investigaciones como la de Cimoli *et al.* (2005), publicada por CEPAL, señalan que la apertura comercial en América Latina impulsó cambios estructurales desiguales, generando especialización en sectores de bajo valor agregado en algunos casos. De manera similar, Kupfer y Rocha (2005) encontraron que el cambio estructural en Brasil estuvo marcado por una transición hacia actividades menos intensivas en tecnología, un patrón que parece repetirse en otras economías de la región.

Un punto clave identificado en el estudio revisado es el impacto de la dolarización en Ecuador, que influyó en su cambio estructural entre 2001 y 2011. Este fenómeno es consistente con el análisis de Ciarli y Giuliani (2005) sobre Costa Rica, donde se documenta que cambios mo-

netarios y de política económica pueden modificar la estructura productiva al influenciar la inversión extranjera y la competitividad. En el caso ecuatoriano, la dolarización tuvo efectos importantes en la inversión privada y la política económica, afectando la diversificación productiva y la estrategia gubernamental de transformación industrial.

Otro hallazgo relevante del estudio revisado es el papel de la inversión extranjera y la apertura comercial. En Ecuador, la inversión privada y la apertura comercial fueron significativas para su dinámica económica, mientras que en México se sumaron dos factores adicionales: la inversión extranjera y la inversión pública. Estudios como el de Rivas y Puebla (2016) confirman que en México la IED ha sido un factor determinante del cambio estructural, aunque con impactos ambiguos sobre el crecimiento y desarrollo. Asimismo, Rodríguez (2009) encontró que la apertura comercial y la IED en México han generado especialización en sectores manufactureros con baja agregación de valor, lo que concuerda con las conclusiones del estudio revisado.

En lo que respecta a la especialización en sectores de bajo valor agregado, el estudio revisado menciona que la inversión extranjera en Ecuador se ha concentrado en actividades extractivas, mientras que en México ha estado dirigida principalmente a la industria maquiladora. Este patrón también ha sido documentado por Mortimore, Vergara y Katz (2001), quienes señalan que la IED en América Latina ha impulsado una orientación productiva hacia sectores con baja innovación y escasa diversificación. De igual manera, De la Mora Sánchez (2017) argumenta que la estrategia mexicana para atraer inversión extranjera ha estado enfocada en manufacturas de ensamblaje, sin generar un desarrollo endógeno con alto valor agregado.

Los hallazgos del estudio son consistentes con la literatura académica sobre cambio estructural en América Latina. La investigación existente refuerza la idea de que la IED y la apertura comercial han generado transformaciones económicas significativas, pero con una tendencia a la especialización en sectores de bajo valor agregado. Además, la influencia de la dolarización en Ecuador y la dependencia de México en la manufactura de exportación han sido documentadas en diversos estudios. En general, los cambios estructurales en la región han estado impulsados más por la inserción en cadenas globales de valor que por estrategias de desarrollo endógeno, lo que ha limitado la capacidad de estos países para generar un crecimiento económico sostenido y una mayor diversificación productiva.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos con la modelación econométrica para México y Ecuador muestran similitudes y diferencias en su dinámica económica en términos de IED, inversión nacional (pública y privada), apertura comercial y su relación con el cambio estructural. Ambos países latinoamericanos, presentaron un cambio en su estructura productiva en función del Valor Agregado Bruto generado, el cual inició en la primera década del siglo XXI.

El VAB ecuatoriano mostró un cambio estructural entre 2001 a 2011, ocasionado en parte por los ajustes de la dolarización ocurrida en el año 2000, afectando las inversiones extranjeras y privadas, y las políticas económicas, mismas que remarcaban la intervención gubernamental en la economía y alineaban la inversión a los objetivos de transformación y diversificación productiva. Mientras que, la economía mexicana presentó un cambio estructural un año después, al iniciar en el año 2002 y terminar en el 2012, periodo en el que el VAB disminuyó, principalmente el asociado al sector secundario.

No obstante, a diferencia de la economía ecuatoriana, en la que la apertura comercial y la inversión privada fueron significativas en el periodo de tiempo analizado 1980 – 2018, en México se observa adicionalmente, dos factores asociados al comportamiento del valor agregado, la inversión extranjera y la inversión pública, a pesar de que esta última ha sido menor comparativamente con Ecuador en estas dos últimas décadas.

La poca consistencia de las inversiones privadas, públicas y la alineación de las inversiones extranjeras hacia sectores con altos rendimientos, en el caso de Ecuador las actividades extractivas, y en México, las maquiladoras, aunado a la incorporación a las cadenas de suministro globales, en las que la apertura comercial en México y Ecuador se ha caracterizado por una alta dependencia a los insumos productivos ha generado distorsiones en el cambio estructural, al direccionarlo hacia actividades productivas de bajo valor agregado y contenido tecnológico, limitando el crecimiento y desarrollo económico sostenido.

## Referencias

Acemoglu D, Robinson J (2013). *Los orígenes del poder, la prosperidad y la pobreza. Por qué fracasan los países*. Ciudad de México, México: Ediciones Culturales Paidós, S.A. de C.V.

Acosta A (2006). La maldición de la abundancia. *CEPAL Review* 88:7-23.

Aiginger K, Rodrik D (2020). Rebirth of Industrial Policy and

an Agenda for the Twenty-First Century. *Journal of Industry, Competition and Trade*. doi:10.1007/s10842-019-00322-3

Alesina A, Perotti R (1996). Income distribution, political instability, and investment. *European Economic Review* 40(6):1203-1228.

Alvarado J (2014). Evolución macroeconómica del Ecuador: un análisis de sensibilidad del sector externo. *Revista Economía y Negocios* 5(2):6-15.

Alvarado A (2019). Análisis exploratorio de la apertura comercial del Ecuador frente a Perú y Colombia. *Revista Economía y Política* 29:9-24.

Andrews DWK (1993). Tests for parameter instability and structural change with unknown change point. *Econometrica* 61(4):821-856.

Badillo J, Rozo C (2019). México en la cadena global de valor de la industria automotriz. *Economía UNAM* 16(48):121-145. doi:10.22201/fe.24488143e.2019.48.492

Balassa B (1985). Exports, policy choices, and economic growth in developing countries after the 1973 oil shock. *Journal of Development Economics* 18(1):23-35. doi:10.1016/0304-3878(85)90004-5

Bai J, Perron P (1998). Estimating and testing linear models with multiple structural changes. *Econometrica* 66(1):47-78.

Banco Central del Ecuador, BCE (2010). La economía ecuatoriana luego de 10 años de dolarización. Quito, Ecuador: Dirección General de Estudios. Recuperado de: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Notas/Dolarizacion/Dolarizacion10anios.pdf>

Banco Central del Ecuador, BCE (2016). La economía ecuatoriana creció en 0.2% en el 2015. Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://www.bce.fin.ec/index.php/boletines-de-prensa-archivo/item/909-la-econom%C3%ADa-ecuatoriana-creci%C3%B3-en-02-en-el-2015>

Banco Central del Ecuador, BCE (2021a). Series históricas. Cuentas Nacionales Anuales: Producto Interno Bruto. Recuperado de: [https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/bi\\_menuCNA-de\\_f.html](https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/bi_menuCNA-de_f.html)

Banco Central del Ecuador, BCE (2021b). Estadísticas de Comercio Exterior. Recuperado de: <https://www.bce.fin.ec/index.php/comercio-exterior>

Banco Central del Ecuador, BCE (2021c). Formación Bruta de Capital Fijo. Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/CuentasNacionales/Anuales/Dolares/indiceFBKF.htm>

Banco México, Banxico (2021). Sistema de Información Económica. Componentes de Inversión Extranjera Directa en México (Principio direccional) – (CE131). Ciudad de México, México. Recuperado de: <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CE131&sector=1&locale=es>

Banco Mundial, BM (2021a). PIB (US\$ a precios constantes de 2010) - Latin America & Caribbean. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD?locations=ZJ>

Banco Mundial, BM (2021b). Importaciones de bienes y servicios (US\$ a precios constantes de 2010). Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD?locations=ZJ>

- bancomundial.org/indicador/NE.IMP.GNFS.KD
- Banco Mundial, BM (2021c). Exportaciones de bienes y servicios (US\$ a precios constantes de 2010) Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NE.EXP.GNFS.KD>
- Banco Mundial, BM (2021d). Formación Bruta de Capital Fijo (% del PIB). Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NE.GDI.FTOT.ZS>
- Banco Mundial, BM (2021e). Inversión Extranjera Directa, entrada neta de capital (% del PIB). Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/BX.KLT.DINV.WD.GD.ZS>
- Banco Mundial, BM (2021f). Gross fixed capital formation (% of GDP) - Gross fixed capital formation, private sector (% of GDP) - Ecuador. Recuperado de: <https://data.worldbank.org/indicador/NE.GDI.FTOT.ZS?locations=EC>
- Baumann F, Kritikos AS (2016). The link between economic structure and value-added generation: Evidence from developing countries. *World Development* 83:232-245.
- Beckerman P, Solimano A (2002). *Crisis and dollarization in Ecuador: Stability, growth, and social equity*. World Bank Publications.
- Blancas A (2015). Fuga de capitales en México: análisis y propuesta de medición. *Revista Problemas del Desarrollo* 181(46):11-48.
- Blancas A, Aliphath R (2021). Matriz de contabilidad social: reflexiones para el análisis económico de México. *Revista Problemas del Desarrollo* 52(205):109-143. doi:10.22201/iiec.20078951e.2021.205.69711
- Borensztein E, De Gregorio J, Lee JW (1998). How does foreign direct investment affect economic growth? *Journal of International Economics* 45(1):115-135. doi:10.1016/S0022-1996(97)00033-0
- Brown R., Durbin J. y Evans J. (1975). Techniques for testing the constancy of regression relationships over time. *Journal of the Royal Statistical Society Series (37)*:149-192.
- Cárdenas, E. (1987). *La industrialización mexicana durante la Gran Depresión*. México: Colegio de México.
- Cárdenas E, Ocampo J, Thorp R (2000). The Export Age: The Latin American Economies in the Late Nineteenth and Early Twentieth Centuries. En Cárdenas E, Ocampo J, Thorp R (Eds.). *An economic history of Twentieth-Century Latin America* (pp. 1-31). London: Palgrave Macmillan
- Castillo R, Herrera J (2005). Efecto del gasto público sobre el gasto privado en México. *Estudios Económicos* 20(2):173-196.
- Cimoli M, Porcile G (2015). Productividad y cambio estructural: el estructuralismo y su diálogo con otras corrientes heterodoxas. En Bárcena A, Prado A (Eds.). *Neoestructuralismo y corrientes heterodoxas en América Latina y el Caribe a inicios del siglo XXI* (pp. 225-240). Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- Ciarli T, Giuliani E (2005). *Inversión Extranjera Directa y encadenamientos productivos en Costa Rica*. CEPAL.
- Cimoli M, Porcile G, Primi A, Vergara S (2005). *Cambio estructural, heterogeneidad productiva y tecnología en América Latina*. CEPAL.
- Comisión para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2015). La Inversión Extranjera Directa en América Latina y el Caribe. Síntesis y Conclusiones. Recuperado de: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38214/S1500535\\_es.pdf?sequence=9&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38214/S1500535_es.pdf?sequence=9&isAllowed=y)
- Comisión para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2019). Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2019. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas.
- Chang H (2002). *Kicking Away the Ladder: Development Strategy in Historical Perspective*, Londres, Inglaterra: Anthem Press.
- Chiatchoua C, Neme O, Valderrama A (2016). Inversión Extranjera Directa y empleo en México: análisis sectorial. *Economía Informática* 398:40-59.
- Chow C (1960). Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica* 28(3):591-605.
- De la Mora Sánchez LM (2017). Políticas para la atracción de Inversión Extranjera Directa como impulsora de la creación de capacidades locales y del cambio estructural. El caso de México. *Serie Desarrollo Productivo*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- De Long JB y Summers LH (1991). Equipment investment and economic growth. *The Quarterly Journal of Economics* 106(2):445-502. doi:10.2307/2937944
- Dunning JH (1981). *International Production and the Multinational Enterprise*. Routledge Library Editions: International Business. Taylor & Francis
- Dussel E (2000). La inversión extranjera en México. *Serie Desarrollo Productivo*. Santiago de Chile: CEPAL.
- ECLAC (2020). Economic Survey of Latin America and the Caribbean 2020: The challenges of restoring growth and employment. Santiago: United Nations.
- Edwards S (1993). Openness, Trade Liberalization, and Growth in Developing Countries. *Journal of Economic Literature* 31(3):1358-1393.
- Fonseca J (2009). El impacto de la inversión pública sobre la inversión privada en México, 1980-2007. *Estudios Económicos* 24(2):187-224.
- Gutman V, López A, Ramos D, García P (2016). Análisis de los mecanismos de regulación y promoción de la Inversión Extranjera Directa (IED) en Ecuador. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Hamilton A (5 de diciembre de 1791). Alexander Hamilton's Final Version of the Report on *the Subject of Manufactures*. [Comunicado de Prensa]. Recuperado de <https://founders.archives.gov/documents/Hamilton/01-10-02-0001-0007>
- Hendry D, Clements M (2001). Economic forecasting: Some lessons from recent research, Technical report, U.K. Economic and Social Research Council.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2021a). PIB y Cuentas Nacionales. Por actividad económica. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/#Tabulado>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2021b). Comercio exterior. Balanza comercial de México. Series originales. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/balanza/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2021c). México: Nuevas estadísticas de informalidad laboral. Recuperado de: [https://www.snieg.mx/DocAcervoINN/documentacion/inf\\_nvo\\_acervo/SNIDS/ENOE/Informalidad\\_FINAL.pdf](https://www.snieg.mx/DocAcervoINN/documentacion/inf_nvo_acervo/SNIDS/ENOE/Informalidad_FINAL.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC (2021). Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo. Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/empleo-abril-2021/>
- Jordà Ò, Taylor AM (2016). The time for austerity: estimating the average treatment effect of fiscal policy. *The Economic Journal* 126(590):219-255.
- Kupfer D, Rocha F (2005). *Productividad y heterogeneidad estructural en la industria brasileña*. CEPAL.
- List F (1909). *The National System of Political Economy*. London: Longmans, Green, And Co.
- Manami W (2013). La dinámica de los acuerdos internacionales de inversión en los andinos. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional* 13:549-582.
- Urdaneta A, Prieto R, Guerrero M, Ramos M (2024). Impacto macroeconómico de la dolarización en el Ecuador durante el período 2006-2023. *Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales* 26(3):895-916.
- Moreno J, Moguel J (1989) Inversión Extranjera Directa: ¿alternativa a la crisis mexicana? *Momento Económico* 45:9-13.
- Moreno-Brid JC, Santamaría J, Rivas Valdivia JC (2006). Manufactura y TLCAN: un camino de luces y sombras. *Economía UNAM* 3(8):95-114.
- Mortimore M, Vergara S, Katz J (2001). *La competitividad internacional y el desarrollo nacional: implicancias para la política de Inversión Extranjera Directa en América Latina*. CEPAL.
- Ocampo J (2005). La búsqueda de la eficiencia dinámica: dinámica estructural y crecimiento económico en los países en desarrollo. En Ocampo J. (Eds.). *Más allá de las reformas: dinámica estructural y vulnerabilidad macroeconómica* (pp. 3 - 50). Bogotá: Publicación de Comisión Económica para América Latina y el Caribe y Naciones Unidas.
- Oleas J (2013). *Ecuador 1972–1999: Del desarrollismo petrolero al ajuste neoliberal* [Tesis de doctorado, Universidad Andina Simón Bolívar]. Repositorio Institucional – Universidad Andina Simón Bolívar.
- Organización Internacional del Trabajo, OIT (2014). Notas sobre formalización: El empleo informal en México: situación actual, políticas y desafíos. Recuperado de: <https://tinyurl.com/htsbz94u>
- Organización Internacional del Trabajo, OIT (2021). Perspectivas sociales y del empleo en el mundo. Empleo por sectores. Recuperado de: <https://tinyurl.com/tcnprbka>
- Palma G (2005). The seven main ‘stylized’ facts of the Mexican economy since trade liberalization and NAFTA. *Industrial and Corporate Change* 14(bi, 6):941–91
- Pérez R (2017). Extractivism and industrialization: The case of Ecuador’s productive transformation. *Latin American Economic Review* 26(1):1-22.
- Ramey VA, Shapiro MD (1998). Costly capital reallocation and the effects of government spending. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 48:145-194.
- Rivas S, Puebla A (2016). Inversión Extranjera Directa y crecimiento económico. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas* 11(2):51-75.
- Rodríguez G (2002). Modelos estructurales en el contexto de las series temporales económicas, Documento de trabajo, Universidad de La Laguna y Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Rodríguez A (2009). Apertura comercial, balanza comercial e Inversión Extranjera Directa en México, 1980-2006. *Investigación económica* 68(269):73-111.
- Rodrik D (11 de Octubre de 2021). The metamorphosis of growth policy. Project Syndicate. Recuperado de: <https://tinyurl.com/5n8np86f>
- Rouquié A, Ramos G (2015). México y el TLCAN, veinte años después. *Foro Internacional* 55(2):433-453.
- Rowthorn R, Ramaswamy R (1999). Growth, trade and deindustrialisation. *IMF Staff Papers* 46:1841
- Solow RM (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics* 70(1):65-94. doi:10.2307/1884513
- Suárez-Dávila F (2019). Alexander Hamilton: Creador del estado desarrollador. *Economía UNAM* 16(48):55-65.
- Thirlwall AP (1983). A Plain Man’s Guide to Kaldor’s Growth Laws. *Journal of Post Keynesian Economics* 5(3):345-358. doi: 10.1080/01603477.1983.11489375.
- Thirlwall AP (2002). *The nature of economic growth: An alternative framework for understanding the performance of nations*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Thirlwall AP (2019). Thoughts on balance-of-payments constrained growth after 40 years. *Review of Keynesian Economics* 7(4):554-567.
- Tregenna F (2009). Characterising deindustrialisation: an analysis of changes in manufacturing employment and output internationally. *Cambridge Journal of Economics* 33:433-66.
- Tregenna F (2011). Manufacturing productivity, deindustrialization, and economic growth. *Economic Systems Research* 23(2):129-156.
- Zeileis A, Leisch F, Hornik K, Kleiber C (2005). Monitoring structural change in dynamic econometric models. *Journal of Applied Econometrics* 20(1):99-121.



# El impacto ambiental de la producción de cobre en el Michoacán Colonial

The environmental impact of copper production in the Colonial Michoacán

Roberto Lindig Cisneros<sup>1\*</sup> , Liliana Sánchez Montañón<sup>1</sup> , José Luis Punzo Díaz<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Antropología e Historia — centro INAH. Michoacán

## Historial

Manuscrito recibido: 6 de abril de 2025

Manuscrito aceptado: 7 de agosto de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Roberto Lindig-Cisneros

[rlindig@iies.unam.mx](mailto:rlindig@iies.unam.mx)

ORCID: 0000-0003-2542-7038

## Resumen

El impacto ambiental de las actividades humanas ha influido en el colapso de sociedades antiguas como las mayas y teotihuacanas, debido a cambios ambientales. En Michoacán, la fundición de cobre comenzó en tiempos prehispánicos, dejando efectos en el suelo y la vegetación, y durante la colonia, la minería de cobre aumentó junto con la explotación forestal. El presente estudio analiza el impacto de la minería en los periodos prehispánico y colonial, con base en documentos históricos y registros arqueológicos. Aunque la deforestación no fue extensa, el impacto local fue significativo, con residuos de la metalurgia que siguen contaminando el suelo por metales pesados. Este trabajo destaca la importancia de comprender el impacto histórico de las actividades humanas para evaluar sus efectos actuales y establecer estrategias de manejo sustentable a largo plazo.

**Palabras clave:** deforestación; impacto ambiental; minería; occidente de México.

## Introducción

El impacto ambiental de las actividades humanas en tiempos pretéritos puede generar consecuencias a largo plazo cuyos efectos son significativos en el presente. Por otro lado, la controversia es considerable sobre el papel que tuvo la degradación ambiental en el colapso de sociedades. Ejemplos de esto en Mesoamérica son abundantes, e incluyen a Teotihuacán y la zona Maya. Tal vez el más citado es el caso de la civilización maya del período Clásico que causó que muchas ciudades del sur del territorio ocupado colapsaran y los centros de población del norte cobraran importancia. Este proceso se ha atribuido a múltiples causas, incluyendo conflictos

## Abstract

The environmental impact of human activities has influenced the collapse of ancient societies such as the Maya and Teotihuacan, due to environmental changes. In Michoacán, copper smelting began in pre-Hispanic times, leaving effects on soil and vegetation, and during the colony, copper mining increased along with logging. This study analyzes the impact of mining in the pre-Hispanic and colonial periods, on the basis of historical documents and archaeological records. Although deforestation was not extensive, the local impact was significant, with metallurgical residues still affecting soil by heavy metals. The study highlights the importance of understanding the historical impact of human activities to assess their current effects and to establish sustainable management strategies in the long term.

**Keywords:** deforestation; environmental impact; mining; Western Mexico.

sociales, deforestación y sequía, o la combinación de sucesos, destacando el papel combinado de la sequía y conflictos sociales como causales de este declive tanto en el Clásico como en el Postclásico (Kennett *et al.*, 2022). Otro ejemplo citado frecuentemente sobre el papel de la degradación ambiental en el colapso de una civilización es el de la isla de Rapa Nui (la Isla de Pascua), sin embargo, estudios recientes cuestionan la validez de esta interpretación al proponer que no se cuenta con evidencias sobre un colapso previo al contacto con europeos (DiNapoli *et al.*, 2020).

Los casos anteriores ilustran el hecho de que el colapso de ciudades, regiones o civilizaciones, es multifactorial,

pero no invalidan la importancia de considerar el impacto ambiental de sociedades del pasado. En un estudio previo (Osuna-Vallejo *et al.*, 2022), en el sitio arqueológico de Jicalán Viejo, se pudo determinar que los vestigios arqueológicos tienen un efecto diferencial, de acuerdo con su origen, sobre la presencia y desarrollo de la vegetación, tanto silvestre como cultivada. En este sitio, desde épocas precolombinas se benefició y trabajó el cobre, en la actualidad es posible detectar las consecuencias de estas actividades en la propia vegetación al detectar concentraciones elevadas de este elemento (entre 31 y 73  $\mu\text{g/g}$ ) en el tejido vegetal.

El caso de Jicalán Viejo plantea la cuestión de cuál fue el impacto de las actividades del aprovechamiento del cobre en el Occidente de México en el período comprendido desde un poco antes de la llegada de los españoles al período colonial. Roskamp (2010) resalta la gran importancia de la metalurgia en los pueblos del Occidente de México, específicamente en el período Postclásico en Michoacán. Comenta que los metales se consideraban sagrados y según sus creencias estos emergían de los dioses y les pertenecían a ellos. Así, la explotación de los recursos y los procesos de fundición requerían permiso y asesoramiento de las fuerzas divinas, obtenidas a través de rituales especiales realizados antes, durante y después de los procesos metalúrgicos.

## Metodología

A partir de una revisión de documentos históricos y estudios sobre la producción de cobre se reconstruye la historia de la explotación y beneficio de este metal desde la época prehispánica y en particular en la época colonial. Con base en los registros históricos se realizaron estimaciones sobre la producción de cobre para el período mencionado y se calculó el impacto ambiental de esta actividad. Así mismo, se llevaron a cabo prospecciones arqueológicas en distintas zonas del estado de Michoacán, donde se localizaron y registraron sitios que presentan materiales de la producción metalúrgica antigua, especialmente las escorias de dicha producción llamadas “querendas” en purépecha, así como vestigios de hornos. Para estimar el impacto sobre los bosques se partió del estudio de Rose *et al.* (2020) quienes reproducen métodos de extracción de cobre de calcopirita y calculan el consumo de combustible, y la madera disponible por hectárea a partir de los estudios de Vásquez-Fabián *et al.* (2017) para bosques con dominancia de *Pinus pseudostrabus* en el estado de Oaxaca, dado que es la especie de pino más común en

los bosques de Michoacán en las cercanías de la mayoría de los sitios de fundición históricos y las estimaciones de Hernández-Moreno *et al.* (2020), para bosques de la zona de la mariposa monarca.

## Resultados y discusión

La actividad metalúrgica alrededor del cobre se puede dividir en tres fases, la primera en sus orígenes (700-900 D.C.), período en que llega esta tecnología desde Sudamérica, posteriormente un período de expansión de entre los años 900 al 1300, cuando aparecen objetos metálicos en lugares tan norteños como el Suroeste de EUA y finalmente, un período del 1300 a la llegada de los españoles, donde se puede ver una especialización y regionalización en la producción. Fue en este período final que el auge de la actividad minera de cobre en Mesoamérica cobró una gran importancia con el establecimiento del Señorío Tarasco y las conquistas de este hacia la Tierra Caliente en el siglo XV cuestión que continuó durante todo el siglo XVI ya tras la llegada de los españoles a la región.

En la primera fase, los principales usos eran suntuarios y rituales y se utilizó mayormente el cobre nativo que se trabajó en frío o con el método de cera perdida. En la segunda y tercera fase se dieron innovaciones importantes como el uso de aleaciones (bronce de cobre-estaño y cobre-arsénico, cobre-oro, cobre-plata, además de aleaciones ternarias de cobre-arsénico-estaño y cobre-plata-oro), lo que amplió la gama de objetos elaborados y sus usos (Trujillo 2013), fue en este último período cuando la explotación de las minas en Tierra Caliente fue más organizada desde el corazón del Señorío Tarasco en Tzintzuntzan. Sobre este importante período existe un documento titulado “Minas de cobre en Michoacán” elaborado por Vasco de Quiroga en donde se reunió información para el conocimiento de los reyes españoles sobre las minas de cobre en la Nueva España, para su explotación. Este documento, hecho en 1533 con ayuda de cinco fundidores indígenas, confirma que los tarascos contaban con minas de cobre propias desde mucho antes de la llegada de los españoles y que tenían amplios conocimientos tecnológicos que fueron usados por los europeos.

Las minas, de acuerdo con el documento, se localizaban en la Huacana, Turicato, Churumuco, Cinagua, Cucarán, Pungarabato, Guayameo, Tancítaro, Tacámbaro, Coyura, Uruapan, Cucamala, Tepalcatepec, Ajuchitlán y Feriguán (Uribe Salas 1996). Gracias a los trabajos arqueológicos realizados y el estudio

de dichas fuentes históricas, hemos podido localizar trabajos mineros de este periodo en Churumuco, Cosian e Inguarán, que posiblemente abastecieron en época prehispánica buena parte de la producción, lo cual se representa en la **Figura 1**.

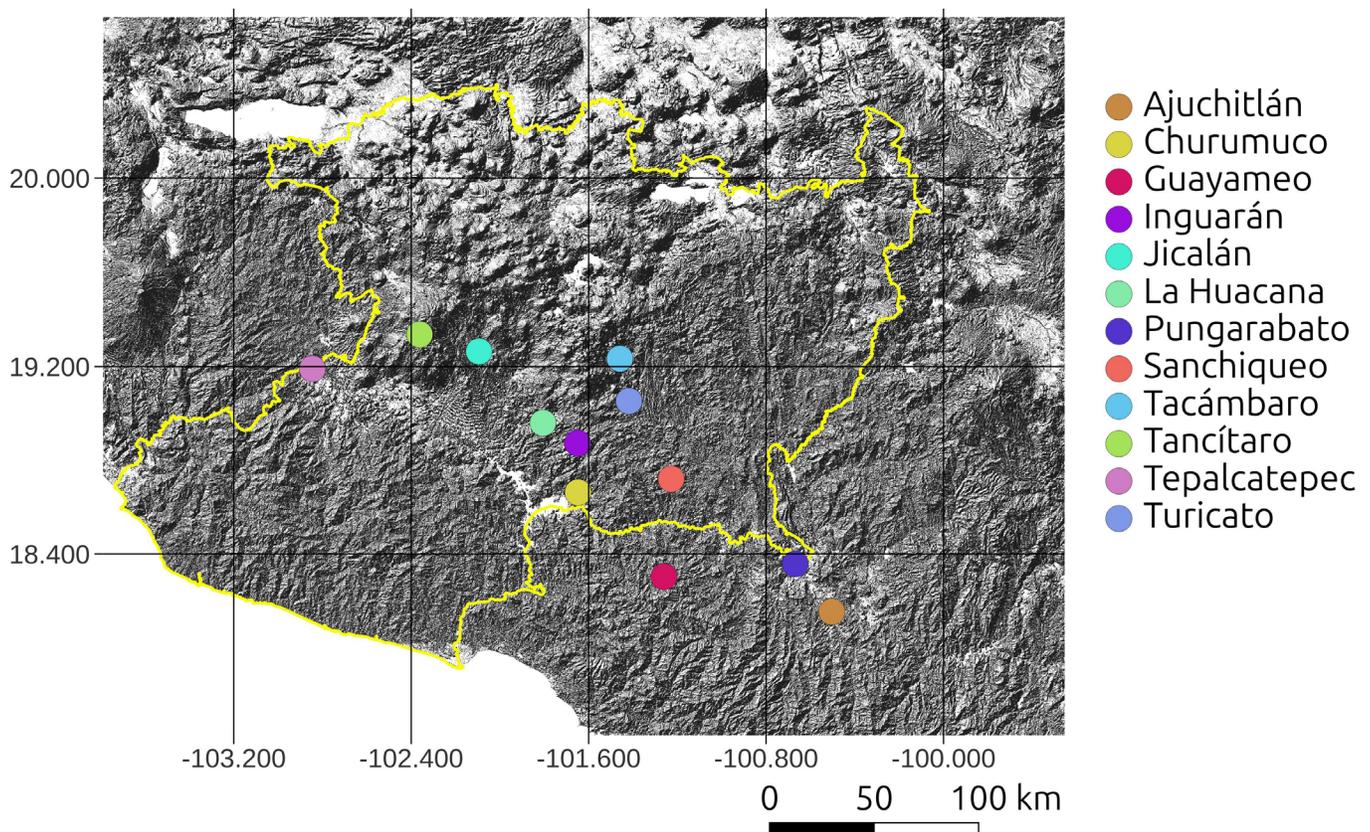
No obstante, con la llegada de los españoles no desaparecieron las prácticas alrededor del trabajo del cobre, de hecho, como menciona Castro Montes (2019) se resignificó perdiendo el carácter social y religioso que tuvo en la época precolombina para ajustarse a los intereses económicos y militares de España. La mayor parte de las explotaciones de cobre en la región sucedieron en el cerro de Inguarán, y a partir del siglo XVII, la Corona intervino y embargó a los indígenas la mina del Rey o de San Bartolomé, que era la más grande encontrada en este cerro.

Gavira (2023) comenta que el comercio del metal no estaba prohibido siempre y cuando las minas estuvieran registradas y los dueños pagaran su respectivo impuesto a la Corona. Pero a partir de 1620 ya se había prohibido a los particulares vender cobre y desde el año 1780 la Corona española intentó controlar aún más la producción y su precio en la Nueva España. Gracias a esto, el mercado novohispano sufrió una crisis de suministro y se dieron

prácticas de contrabando, lo que en realidad terminó beneficiando a pequeños productores, pues lo vendían a los mercados regionales aprovechando la carencia. El cobre empezó a ser más demandado durante el siglo XVIII para fines monetarios y fabricación de armas. Por esta razón en 1780 se tomaron medidas más rígidas para controlar su explotación, acopio, distribución, calidad y precio.

En resumen, el monopolio no afectó realmente de forma negativa la producción de cobre en general, pero si había una producción de cobre no controlada por la Corona y por lo mismo no hay forma de estimarla. Como menciona Gavira (2023, p.11), lo que ocurrió a partir de 1780 fue un reacomodo del comercio del metal que fomentó su extracción por pequeños productores.

Existen en México distintos sitios donde se realizó la extracción y fundición de cobre, como Jicalán Viejo, un poblado localizado al sur del estado de Michoacán (Osuna-Vallejo *et al.*, 2022). Aquí se desarrolló la tecnología para la fundición como se percibe por los restos y herramientas encontrados en el sitio. Los autores comentan que seguramente el cobre utilizado fue extraído de Inguarán, que es una de las minas de mayor tamaño tanto en la época precolombina como



**Figura 1.** Principales sitios de producción y fundición de cobre en la época prehispánica.

en la Colonial, localizada a unos sesenta kilómetros al sureste del sitio, en la zona montañosa de Tierra Caliente en Michoacán (Osuna-Vallejo *et al.*, 2022).

La primera referencia concreta sobre la producción de cobre en lingotes ya en la época colonial corresponde al período entre 1548 y 1550. Comentan que los fundidores de Jicalán daban al encomendero de Uruapan seis cargas pequeñas de cobre, mantas, pañuelos y manteles cada ochenta días. En total se entregaban veinticuatro cargas anuales, o 950 kilogramos de cobre, que, en esa época, era medido en quintales, unidad de peso española antigua que equivalía a 100 libras castellanas, o a 46 kilogramos, aproximadamente (Castro Montes 2019). Entonces, al dividir los 950 kg de cobre sobre 46 daría un total de 20.65 quintales de cobre producidos en esta región.

Al conocer la cantidad de cobre producida, nos podemos dar una idea sobre el trabajo de metalurgia de esta zona para mediados del siglo XVI. Podemos percatarnos de que no hay minas de cobre alrededor de Jicalán, sino a 60 kilómetros de distancia del mismo, por lo tanto, tuvieron que haber existido caminos de traslado del mineral para poder realizar la fundición primaria. Como mencionan Osuna-Vallejo *et al.* (2022) en este sitio se trabajaba el metal en términos de la fundición primaria y de la elaboración de objetos diversos (como hachas y azuelas) a partir de los lingotes obtenidos de la fundición. Al mismo tiempo, cabe destacar, que el trabajo metalúrgico no se interrumpió con la Conquista, sino que continuó y los mismos españoles utilizaron el conocimiento de los habitantes de la zona sobre la fundición metalúrgica para su beneficio, pero proporcionando herramientas y tecnologías nuevas.

La cantidad de cobre producido en el Occidente de México anualmente variaba en cada año, y no existen datos detallados al respecto. Gavira (2023) hace notar que las cantidades del metal enviadas a España variaban considerablemente, así, en el año 1780 se enviaron cerca de 3000 quintales desde la Nueva España. En años sucesivos se aumentaron las cifras hasta 4000 y 5000 quintales. De hecho, en 1792 la cantidad alcanzó 10800 quintales pero en 1793 bajó a 7300 quintales. Castro Montes (2019), indica que en el año 1528 se mandó a la Casa de Munición de México desde Michoacán la cantidad de 800 quintales de cobre. Por su parte, Uribe Salas (1993) señala que en 1800 la producción de Nueva España fue de 9684 quintales, y la mayoría de esta producción provenía de Michoacán, no obstante, la demanda no se cumplía, pues esta era en 1799 de 20300 quintales, más del doble de la cantidad producida.

Uribe Salas (1996) describe cómo en 1533 se interrogó a fundidores indígenas sobre sus técnicas de fundición,

información plasmada en El Legajo 1204, publicado con el nombre de Las minas de cobre de Michoacán. En este texto se menciona que cada fundidor producía un tejuelo o lingote de cobre al día, estos tenían una medida de 17 centímetros por 3.5 centímetros; y pesaban 4.25 kilogramos, aproximadamente, de tal forma que, siguiendo este ritmo de producción en un mes la producción sería de 30 tejuelos o de 128 kilogramos. Por lo tanto, diez fundidores producirían al mes 1300 kilogramos de cobre, y esto dividido entre 46 (un quintal= 46 kg) (Castro Montes 2019), daría un total de 339 quintales para este año, pero no se menciona el origen del metal.

Según Castro Montes (2019) en el mismo Legajo 1204 describen que un hombre indígena de Michoacán y fundidor de las minas La Huacana, Churumuco y Cosian aseguró que en un día producían un pedazo o un tejuelo de cobre del ancho de un “jeme”, del grueso de una mano y del ancho de dos dedos. Un “jeme” era una medida de longitud antigua y es la distancia que existe desde la extremidad del dedo índice hasta el pulgar cuando se extienden por completo (Castro Montes 2019). Así, esta autora señala en base a estas medidas, que el peso aproximado del lingote era de entre 1.6-2.4 kg hasta 4.5 kg. Menciona también que la producción de cobre era bastante mayor en la época prehispánica que en la época colonial temprana, pues había una mayor cantidad de trabajadores en las minas (Castro Montes 2019). Un relato menciona que un fundidor de la Huacana confirmó que en la época del Cazonci (antes de la conquista) 40 fundidores podían producir 10 cargas de cobre en 10 días, pero en 1533 cinco personas producían solamente un tejuelo al día. Según el Legajo 1204, una carga es lo que puede cargar una persona, 23 kilogramos aproximadamente, y una carga son 20 tejuelos; así, en la época del Cazonci los fundidores de la región La Huacana podrían producir un aproximado de 230 kilos de cobre en 10 días (Castro Montes 2019), lo cual se traduce en 8395 kg de cobre divididos entre 46 da un total de 182.5 quintales de cobre anuales. En 1533 los 4.25 kg fundidos por 5 trabajadores multiplicado por 365 días al año (esto, si no descansaran) da un total de 1551.25 kg, dividido sobre 46 serían solamente 33.72 quintales de cobre al año (Castro Montes, 2019)

Castro Montes (2019) indica que durante la época del Cazonci los fundidores trabajaban el cobre solamente cuando este lo demandaba y que mientras no lo hacía, ellos trabajaban sus cultivos. Con esta información se puede notar como la minería no era tan demandante, pues no requería de un empleo de tiempo completo.

En 1542 se menciona que en los libros de tributos que la Huacana reportaba, se debían realizar nueve entregas

de 40 pedazos de cobre, una cada 40 días. Al realizar las cuentas, serían 18 cargas al año, o aproximadamente 414 kg, y al dividir esta cantidad entre 46 serían 9 quintales de cobre anuales (Castro Montes 2019). Pátzcuaro entregaba 2500 kg de cobre, pero no especifica si es por año o cada 40 días. Al dividir estas cantidades entre 46 daría un total de 54.34 quintales y 495.92 quintales (al multiplicarlo por 9.125 [365/40]) respectivamente, esto en la región de la Huacana.

Por último, en el Legajo 1204 se informó que 40 indios producían 200 tejuelos de cobre en un año, es decir, 10 cargas o 2300 kg. En cambio, el mismo fundidor de la Huacana dio datos más optimistas al plantear que 40 personas podrían producir 10 cargas de cobre en solo 40 días, lo cual significa 50 quintales (2300 kg / 46) o 456.25 quintales (365/40 x 2300 kg / 46), ambas cantidades calculadas para un año.

Con lo antes expuesto, se cuenta con datos sobre la producción aproximada de cobre anual total para distintos años en el período 1528 a 1800. Castro Montes (2019) estima una producción de 800 quintales para el año 1528. Posteriormente, Gavira (2023) menciona en un artículo titulado “El cobre en Michoacán a fines del siglo XVIII: política minera, productores, aviadores y mercados” que en 1780 se enviaban desde Nueva España 3000 quintales de cobre, después de esto dice que aumentaron las cifras hasta 4000 y 5000 quintales, y en el año 1792 la cantidad subió hasta 10800 pero en 1793 bajó a 7300. Finalmente, en el artículo “La explotación del cobre en la Nueva España” Uribe Salas (1993) reporta la producción total de cobre en la Nueva España para 1800 en 9684 quintales. Al recabar esta información se realizó la siguiente línea del tiempo (Figura 2).

Dentro del proceso metalúrgico se encuentra el

beneficio del cobre, el cual se entiende como el arte y ciencia de extraer los metales de los minerales; gracias a esto es que se pueden emplear los metales en la fabricación de instrumentos variados, abarcando además técnicas como la fundición, aleación, purificación, amalgamación, etc. (Zamora 2003).

Los descubrimientos arqueológicos evidencian que entre los pueblos originarios de América existía un profundo conocimiento práctico sobre la extracción minera, el trabajo con metales y la orfebrería. Por lo tanto, los pueblos mesoamericanos debieron contar con personas especializadas en la búsqueda y localización de yacimientos minerales, que generalmente se explotaban a cielo abierto o a poca profundidad. El conocimiento que adquirirían los buscadores durante su prospección se basaba en la comprensión de las propiedades físicas de los minerales y las características del terreno (Jiménez 2017).

Los indígenas americanos poseían una gran habilidad técnica para recolectar piedras, minerales y metales, ubicar minas y procesar estos materiales, los cuales estaban conectados con su cosmovisión. Tras la extracción de los minerales, realizaban el proceso de beneficio de los metales, que a menudo se llevaban a cabo fuera de las minas. Los metales, que variaban en su pureza y, en algunos casos, se utilizaban en aleaciones, pasaban por diversos procedimientos para transformarse en una amplia variedad de objetos. Se usaban hornos de barro, en los cuales se combinaban fragmentos de mineral metálico con carbón. Una vez encendido el horno y alimentado el fuego mediante el aire soplado a través de tubos, conseguían separar el metal, que se recogía en el fondo del horno. En las antiguas minas de cobre, el proceso de purificación del metal se realizaba mediante varias fusiones sucesivas, a veces hasta tres, utilizando

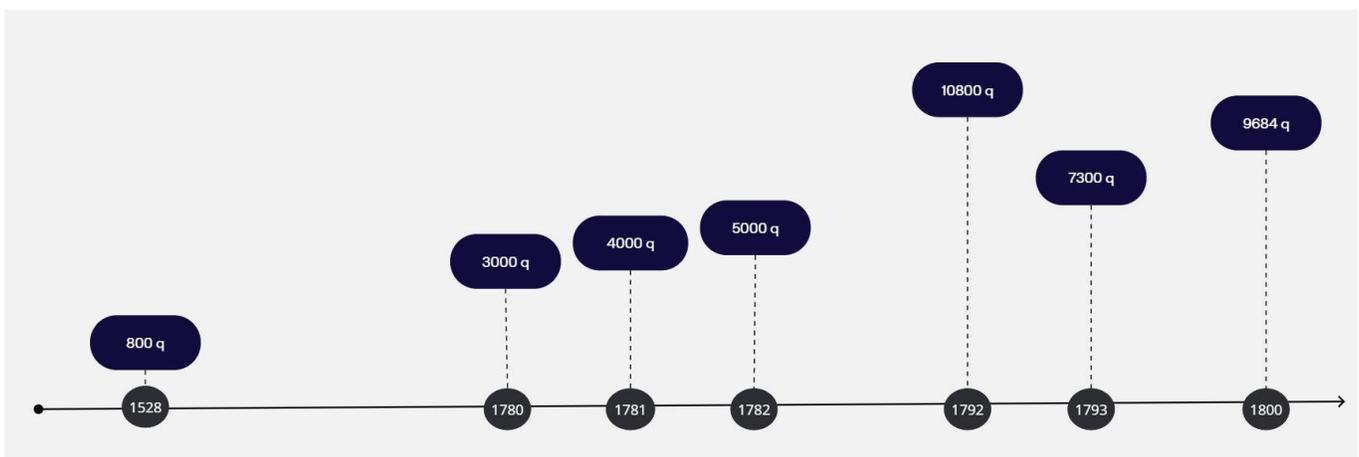


Figura 2. Línea del tiempo de la producción de cobre total anual en la Nueva España.

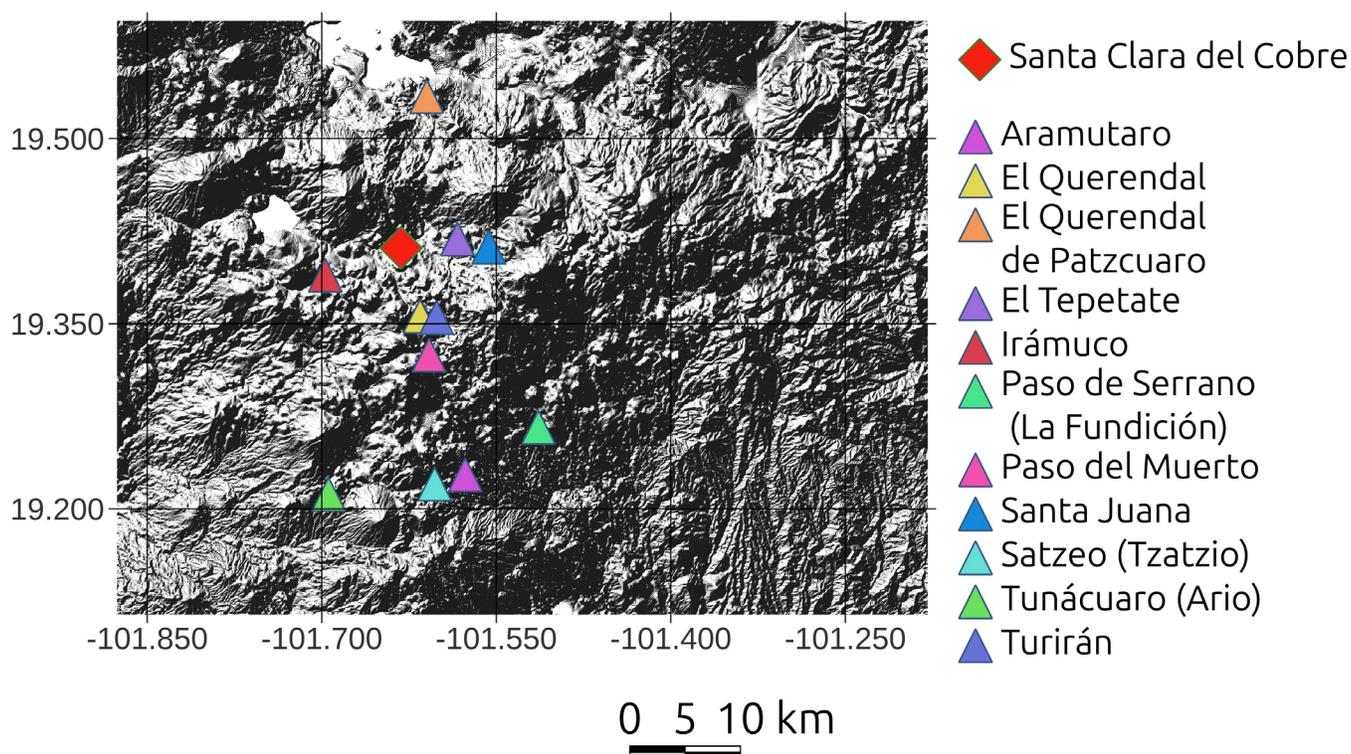
también los tubos para avivar el fuego (Zamora 2003).

El proceso de beneficio o fundición utilizado durante la época colonial, no sufrió grandes cambios respecto al método empleado por los pueblos locales. Después de moler el mineral, los fundidores lo mezclaban con leña carbonizada y lo ponían en un “crisol” o en “pozos poco profundos de tierra” que estaban revestidos con una mezcla de barro y cenizas. Para aumentar la temperatura, soplaban aire a través de tubos de caña. Según un fundidor indígena, era necesario “fundir dos o tres veces para que quede como ha de estar” y pudiera ser trabajado para fabricar herramientas útiles, especialmente para cortar y labrar la tierra (Uribe Salas 1993).

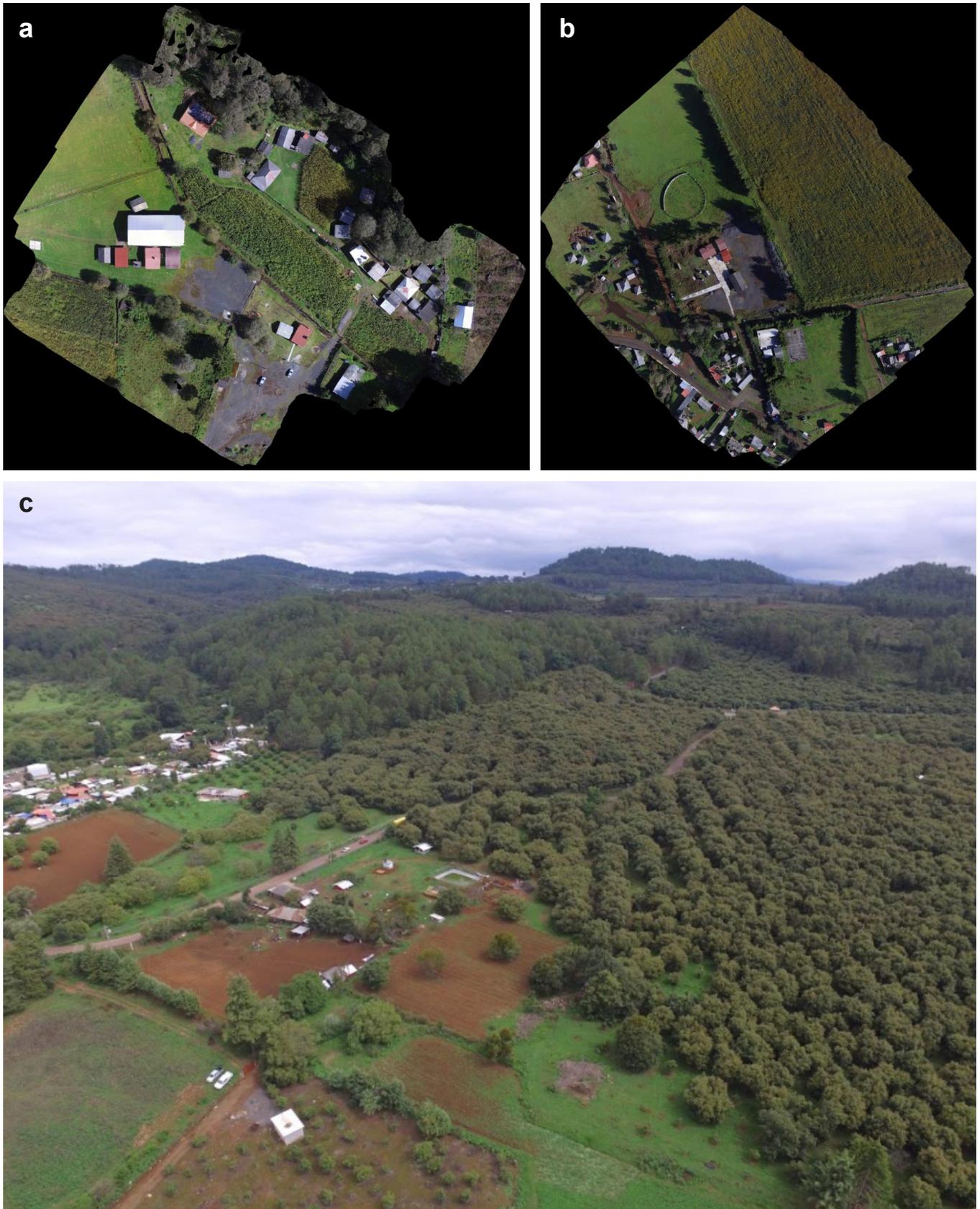
Para acelerar la producción de cobre y obtener mayores cantidades, los españoles empezaron a utilizar fuelles, generalmente accionados manualmente, y sustituyeron la leña por carbón. Siguiendo las técnicas indígenas, también “calcinaban dos o tres veces el mineral metálico, en un proceso de calcinación conocido como ‘reverbero’, previo a la fundición”. Dado que la mayoría de los minerales metálicos se asocian con sulfatos, este calentamiento previo servía para eliminar los sulfuros. El cobre generalmente se obtenía en la primera fundición, ya que los concentrados de cobre solían estar bastante puros, lo que contribuyó a la

reputación y la alta demanda del cobre michoacano. Cuando el cobre se solidificaba en el pozo, se extraía y se colocaba en planchas. Es importante señalar que los españoles nunca introdujeron hornos de fundición en la región, aunque a finales del siglo XVIII se propuso el uso de hornos ingleses. Estos métodos de extracción y fundición del mineral continuaron siendo utilizados durante toda la época colonial, lo que explica uno de los desafíos que enfrentó la corona para aumentar la producción, especialmente en la segunda mitad del siglo XVIII (Uribe Salas 1993).

El trabajo de beneficio del cobre dejó como evidencia en el paisaje depósitos de escoria, llamadas “querendas” en Michoacán, de los cuales existen varias localidades ubicadas en las cercanías de Santa Clara del Cobre, donde a partir del siglo XVI se concentró la producción de cobre (Punzo 2014; **Figura 3**). Las escorias son subproductos generados durante la fundición de un metal. Generalmente, consisten en mezclas de óxidos ricos en sulfuros. Su composición depende de la naturaleza de los minerales, los concentrados, los fundentes, las condiciones de operación y otros factores variados. Los principales óxidos que se encuentran en la escoria son: óxidos de hierro ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), óxidos de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) (Alegría 2014). A



**Figura 3.** Principales sitios de producción y fundición de cobre en la época colonial.



**Figura 4.** Querrendales en el Estado de Michoacán, la escoria se reconoce por el color gris en las imágenes, en (a) el poblado de “El Querendal”, en (b) el poblado de “Paso del Muerto” y en (c) un sitio cercano al poblado de Tzitzio en donde se puede apreciar además de huertas de frutales remanentes de bosque de pino.

través del estudio de las escorias es posible estimar las fechas de producción de estos materiales, y así conocer cómo fueron realizándose estos trabajos metalúrgicos desde la época prehispánica hasta la conquista española, lo que evidencia que esta actividad fue continua en el período mencionado (Punzo *et al.* 2015). En la **Figura 4** podemos observar las querendas en tres sitios distintos del Estado de Michoacán.

### **Impacto de la actividad minera y trabajo del cobre en la región occidente de México**

Existe información sobre las prácticas contemporáneas de trabajo del cobre, en particular en Santa Clara del Cobre, en Michoacán. En un reporte de la FAO (1991) titulado “El papel de la biomasa como energético en la industria artesanal de Santa Clara del Cobre, Michoacán,” se indica lo siguiente: “la elaboración de un cazo de 50 kg de peso demanda de medio costal de carbón (aproximadamente 20 kg) y de entre 120 y 140 kg de leña seca, que aproximadamente equivale a 0.25 m<sup>3</sup>”. En el mismo documento se menciona que parte de la madera es leña de desperdicio del aserrío en diversas industrias. Comenta que existe una relación de 50 y 50% en los consumos de leña y carbón y que al mismo tiempo consumen del 60 al 70% del desperdicio de aserrío (según reportes del servicio de Inspección y Vigilancia equivale a 60 000 m<sup>3</sup> anuales), así la demanda de leña como energético en la actividad cobrera sería de aproximadamente 40 000 m<sup>3</sup> al año (FAO 1991). Finalmente, en ese reporte se indica lo siguiente: “la actividad extractiva industrial no mantiene una relación directa con la actividad cobrera”, pero a pesar de ello concluyen que hay un impacto ambiental directo por la extracción ilegal de madera. En otro estudio, Punzo (2014) documentó que las fundiciones tradicionales encontradas actualmente en Santa Clara del Cobre utilizan entre 350 y 400 kilogramos de carbón para la fundición de 200 kg de cobre.

En cuanto al impacto de la industria del cobre desde la llegada de los españoles hasta el año 1800, a partir de la evidencia indirecta y los datos encontrados en las fuentes se pueden hacer estimaciones en términos del consumo de madera y el área de bosques que fue posiblemente impactada. Para ello es necesario, en primer lugar, saber la cantidad de madera necesaria para producir una cantidad de cobre determinada. Para la región occidente de México, como ya se discutió, se conocen diversos aspectos de las técnicas de beneficio de este metal, pero no se cuenta con información sobre el consumo de madera, ya sea de fuentes históricas o a partir de experimentos que reproduzcan las técnicas

antiguas.

Rose *et al.* (2020), llevaron a cabo este tipo de experimentos de beneficio de cobre a partir de calcopirita, el mismo mineral utilizado en el occidente de México, reproduciendo el método a partir de evidencias arqueológicas de la región de los Alpes. El proceso de fundición de cobre descrito en este estudio (Rose *et al.* 2020) implica varias etapas cruciales para la extracción del metal a partir del mineral de calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>). Este mineral, que contiene cobre, hierro y azufre, es uno de los principales recursos para la producción de cobre.

La primera fase del proceso es la preparación del mineral. Esto incluye el triturado y el tamizado del mineral de calcopirita para asegurar que las partículas sean lo suficientemente pequeñas para facilitar la fusión. A menudo, se realiza un pretratamiento térmico para eliminar parte del azufre y mejorar la eficiencia en el proceso de fundición (Rose *et al.* 2020). Una vez preparado, el mineral se mezcla con fundentes como sílice y carbonatos, que ayudan a formar una escoria y a disminuir la temperatura de fusión. La mezcla se coloca en un horno, donde se calienta a temperaturas que oscilan entre 1200 y 1300 grados Celsius. En esta etapa, el azufre se volatiliza, mientras que el cobre se reduce y se separa de los otros elementos.

Durante la fusión, se forman dos fases: una fase líquida que contiene el metal de cobre y otra fase sólida, la escoria, que se compone de impurezas y componentes no metálicos. La escoria, que es menos densa que el metal, flota sobre la superficie y se puede retirar fácilmente (Rose *et al.*, 2020) El proceso de fundición también puede incluir una etapa de afinación, donde el cobre metálico obtenido se purifica aún más para eliminar impurezas adicionales. Esto se logra mediante procesos electroquímicos o térmicos adicionales. Finalmente, el cobre fundido se puede depositar en moldes para obtener lingotes o se puede continuar procesando según sea necesario para aplicaciones específicas.

Asimismo, en el texto de Rose *et al.* (2020), se menciona que se utilizó estiércol como un agente reductor durante el proceso de fundición. En el caso de Latinoamérica no existía el ganado previamente a la llegada de los españoles, por esta razón el estiércol no se pudo utilizar en esa época en Mesoamérica, sin embargo, en el legajo 1204, se menciona que para la fundición se usaban tierras de la Huacana, tal vez como un fundente.

A partir de los experimentos de Rose *et al.* (2020), el consumo de madera para el proceso hasta llegar a 3.6 kg de un producto concentrado en cobre esponjoso (“spongy copper”) pero aun mezclado con escoria y 46 g de cobre metálico fue de 906 kg. Cabe mencionar que,

de éstos, 689 kg se utilizaron como madera y 43.4 kg como carbón, aplicando la proporción de 5 a 1 (madera a carbón) propuesta por la FAO (1991), esta cantidad de carbón equivale a 217 kg de madera.

De las fuentes se sabe la producción reportada para diversos años entre 1528 y 1800 como se ilustra en la **Figura 2**, a partir de esta información en la **Tabla 1**, se presenta esta producción en quintales (como se encuentra reportada) y su equivalente en kilogramos considerando que un quintal corresponde a 46.025 kg, así como la madera consumida en cada año considerando la cantidad mencionada anteriormente para producir los 3.6 kg de cobre esponjoso con escoria (se ignoran los 46 gramos de cobre metálico para estos cálculos). Estos cálculos por lo tanto representan un subestimado, pues se requerirían de pasos posteriores para purificar el cobre esponjoso. Se presentan dos columnas en las que se calcularon las hectáreas y km<sup>2</sup> de bosque requeridas para obtener la madera utilizando solamente a *Pinus pseudostrubus*

usando como aproximación los datos de Vásquez-Fabián *et al.* (2017) que obtuvieron un promedio de 43 000 kg/ha de madera de *Pinus pseudostrubus* en el estado de Oaxaca, esta es la especie de pino más común en los bosques de Michoacán. En las dos últimas columnas, se muestran las hectáreas y km<sup>2</sup> de bosque considerando las estimaciones de Hernández-Moreno *et al.* (2020), para bosques de la zona de la mariposa monarca en Michoacán. En la **Tabla 2**, se presentan los cálculos considerando una producción para cada año equivalente al año con menor producción más cercano.

### Conclusiones

De lo anteriormente expuesto, destaca el hecho de que el área calculada, posiblemente deforestada de 1528 a 1800 no fue tan extensa como podría pensarse, el área de 116.5 km<sup>2</sup> representa el 0.54 % de los bosques templados del Estado de Michoacán de acuerdo al mapa

**Tabla 1.** Estimación de km<sup>2</sup> de bosque utilizados en la producción de cobre en Michoacán, a partir de la producción de cobre en quintales mencionada en la Figura 2.

| Año     | Cobre (quintales) | Cobre (t) | Madera (t) | Hectáreas <i>P. pseudostrubus</i> | Km <sup>2</sup> <i>P. pseudostrubus</i> | Hectáreas de bosque | Km <sup>2</sup> de bosque |
|---------|-------------------|-----------|------------|-----------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| 1528    | 800               | 36.8      | 9266.4     | 215                               | 2.2                                     | 28.7                | 0.3                       |
| 1780    | 3000              | 138.1     | 34748.9    | 808                               | 8.1                                     | 107.5               | 1.1                       |
| 1781    | 4000              | 184.1     | 46331.8    | 1077                              | 10.8                                    | 143.3               | 1.4                       |
| 1782    | 5000              | 230.1     | 57914.8    | 1347                              | 13.5                                    | 179.2               | 1.8                       |
| 1792    | 10800             | 497.0     | 125096.0   | 2909                              | 29.1                                    | 387                 | 3.9                       |
| 1793    | 7300              | 336.0     | 84555.6    | 1966                              | 19.7                                    | 261.6               | 2.6                       |
| 1800    | 9684              | 445.7     | 112169.4   | 2609                              | 26.1                                    | 347                 | 3.5                       |
| Totales | 40584             | 1867.9    | 470082.8   | 10932                             | 109.3                                   | 1454.3              | 14.5                      |

**Tabla 2.** Estimación de km<sup>2</sup> de bosque para cada año equivalente al año con menor producción más cercano utilizados en la producción de cobre en Michoacán, a partir de la producción de cobre en quintales mencionada en la Figura 2.

| Año       | Cobre (quintales) | Cobre (t) | Madera (t) | Hectáreas <i>P. pseudostrubus</i> | Km <sup>2</sup> <i>P. pseudostrubus</i> | Hectáreas de bosque | Km <sup>2</sup> de bosque |
|-----------|-------------------|-----------|------------|-----------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| 1528      | 800               | 36.8      | 9266.4     | 215                               | 2.2                                     | 28.7                | 0.3                       |
| 1529-1780 | 800               | 9241.8    | 2325858.0  | 54090                             | 540.9                                   | 7 195.7             | 72                        |
| 1781      | 3000              | 138.1     | 34748.9    | 808                               | 8.1                                     | 107.5               | 1.1                       |
| 1782      | 4000              | 184.1     | 46331.8    | 1077                              | 10.8                                    | 143.3               | 1.4                       |
| 1782-1791 | 5000              | 2071.1    | 521233.1   | 12122                             | 121.2                                   | 1612.6              | 16.1                      |
| 1792      | 10 800            | 497.1     | 125096.0   | 2909                              | 29.1                                    | 387                 | 3.9                       |
| 1793      | 7300              | 336.0     | 84555.6    | 1966                              | 19.7                                    | 261.6               | 2.6                       |
| 1794-1799 | 7300              | 2015.9    | 507333.6   | 11798                             | 118                                     | 1569.6              | 15.7                      |
| 1800      | 9684              | 445.7     | 112169.4   | 2609                              | 26.1                                    | 347                 | 3.5                       |
| Totales   | 48 684            | 14966.6   | 3766592.7  | 87595                             | 876                                     | 11 653              | 116.5                     |

de ecorregiones terrestres de México de la CONABIO (2008). Dos reflexiones se deben hacer cuando se considera el impacto de las actividades alrededor del trabajo con cobre en el occidente de México en el período estudiado. La primera es que, muy probablemente, la cantidad de hectáreas utilizadas para la obtención de madera para esta actividad esté subestimada, pues hay que considerar que para el cálculo se estimó la producción para los años sin datos como igual a la del año más cercano con el menor valor de producción. Sin embargo, lo más probable es que durante la época colonial se haya dado un aumento gradual en la demanda y que en algunos años se dieran picos de producción considerables como respuesta a incrementos en la demanda. Sumado a lo anterior, no hay forma de estimar la producción clandestina del metal que se dio durante todo este período. La segunda consideración es que el área de la que se extrajo la madera para la obtención del cobre en la época precolonial se encontraba cerca de los sitios de beneficio, lo que implica que el impacto a nivel local seguramente fue considerable, pero no contamos con evidencia documental sobre este particular. Al contrario de lo antes mencionado, el impacto ambiental en los bosques ocasionado en el municipio de Salvador Escalante, en las cercanías de Santa Clara del Cobre fue mayor, debido a la centralización de la producción de cobre en la zona durante la época colonial. Lo que es un hecho es que los bosques se recuperaron a tal grado que en la actualidad en muchas de las localidades con depósitos de querendas persisten bosques templados, como es el caso de Santa Clara del Cobre y Tzitzio en donde hay remanentes de bosques de pino rodeados de huertas que se establecieron en las últimas décadas.

A la escala del sitio de beneficio y trabajo con el cobre, como en Jicalán Viejo, el impacto de estas actividades persiste hasta nuestros días y se manifiesta como altas concentraciones de cobre en el suelo. Estos efectos a largo plazo están documentados para otras regiones, por ejemplo, en la región del Elba, en Italia, en donde hay sitios antiguos de trabajo de hierro, se dan dos fenómenos similares a los observados en el occidente de México, en particular Jicalán Viejo, por un lado, los sitios de fundición se pueden encontrar lejos de las minas pero cerca de las fuentes de madera, y en la actualidad se pueden detectar altas concentraciones de metales en el suelo (Becker *et al.* 2019).

Zhang *et al.* (2017), argumentan que la metalurgia y fundición de metales son de las actividades con mayores consecuencias en el medio ambiente, a pesar de ello, la historia de estos impactos es relativamente desconocida y es necesaria la evidencia arqueológica del origen de la

metalurgia para conocerlos más a fondo. En este sentido, Knabb *et al.* (2016), realizaron un estudio en el Valle de Faynan, en el sur de Jordania en donde la producción agrícola y la metalurgia de cobre han coexistido por 6 000 años. Concluyen que la presencia de sitios contaminados en el valle es muy variable y que es una combinación de factores naturales y culturales. Por un lado, se pueden encontrar los sitios en donde se ha acumulado la escoria, con los riesgos asociados a la contaminación por metales pesados de estos residuos y por otro, los sitios en donde se han acumulado metales pesados movilizables por las características propias del paisaje. En el caso de los querendales en el occidente de México, es posible una situación similar que merece ser investigada.

## Referencias

- Alegría R (2014). *Extracción de escorias de fundición de cobre por vía Hidrometalurgia*. [Tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional.
- Becker F, Eser RA, Hoelzmann P, Schütt B (2019). The environmental impact of ancient iron mining and smelting on Elba Island, Italy – A geochemical soil survey of the Magazzini site. *Journal of Geochemical Exploration* 205:106307. doi:10.1016/j.gexplo.2019.04.009
- Castro Montes DP (2019). Vestigios de fundición primaria prehispanica y colonial en la orfebrería de Santa Clara del Cobre: Un enfoque etnoarqueológico, experimental y comparativo. [Tesis de maestría, El Colegio de Michoacán.] <http://colmich.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1016/676>
- CONABIO (2025). Ecorregiones Terrestres de México. Escala 1:1000000. México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/ecort08gw>
- DiNapoli RJ, Rieth TM, Lipo CP, Hunt TL (2020) A model-based approach to the tempo of “collapse”: The case of Rapa Nui (Easter Island). *Journal of Archaeological Science* 116:105094. doi:10.1016/j.jas.2020.105094.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1991). El Papel de la Biomasa como Energético en la Industria Artesanal de Santa Clara del Cobre, Michoacán. <https://www.fao.org/4/AD096S/AD096S00.htm#TOC>
- Gavira M (2023). El cobre en Michoacán a fines del siglo XVIII: política minera, productores, aviadores y mercados. *Naveg@mérica. Revista electrónica editada por la Asociación Española de Americanistas* 31. doi:10.6018/nav.586071
- Hernández-Moreno JA, Velázquez-Martínez A, Fierros-González AM, Gómez-Guerrero A, Reyes-Hernández VJ, Vera-Castillo JAG (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques* 26(1):e2611802. doi:10.21829/myb.2020.2611802
- Jiménez O (2017). Sobre el origen americano de los descubridores

de metales en la primera mitad del siglo XVI novohispano. *Saberes. Revista De Historia De Las Ciencias Y Las Humanidades* 1:41-73. <https://www.saberesrevista.org/ojs/index.php/saberes/article/view/70>

Kennett DJ, Masson M, Lope CP *et al.* (2022). Drought-Induced Civil Conflict Among the Ancient Maya. *Nature Communications* 13:3911. [doi:10.1038/s41467-022-31522-x](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31522-x)

Knabb KA, Erel Y, Tirosh O, Rittenour T, Laparidou S, Najjar M, Levy TE (2016). *Journal of Archaeological Science* 74:85-101. [doi:10.1016/j.jas.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.09.003).

Osuna-Vallejo, Ramos I, Lindig-Cisneros R, Morales J, Punzo J (2022). Patrones de la vegetación y su relación con vestigios arqueológicos asociados al beneficio de cobre en la localidad de Jicalán Viejo, Michoacán. *Trace* 81:162-180. [doi:10.22134/trace.81.2022.780](https://doi.org/10.22134/trace.81.2022.780)

Punzo J (2014). Santa Clara del Cobre. Zona de Monumentos Históricos. Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Punzo J, Morales J, Goguitchaichvili A (2015). Evidencia de escorias de cobre prehispánicas en el área de Santa Clara del Cobre, Michoacán, Occidente de México. *Arqueología Iberoamericana* 28:46-51. [doi:10.5281/zenodo.1312650](https://doi.org/10.5281/zenodo.1312650)

Rose T, Hanning E, Klein S (2020). Smelting Experiments with Chalcopyrite Ore based on Evidence from the Eastern Alps. *Metalla* 25:77-100. [doi:10.46586/metalla.v25.2019.i2.77-100](https://doi.org/10.46586/metalla.v25.2019.i2.77-100)

Roskamp H (2010). God Of Metals: Tlatlahuqui Tezcatlipoca and the Sacred Symbolism of Metallurgy in Michoacan, West Mexico. *Ancient Mesoamerica* 21:69-78. [doi:10.1017/S0956536110000118](https://doi.org/10.1017/S0956536110000118)

Trujillo A (2013). La teoría Dempster-Shafer en la aplicación de modelos predictivos arqueológicos: El caso de la minería del cobre en Tierra Caliente, Michoacán, México. *Comechingonia. Revista de Arqueología* 17:107-127. [doi:10.37603/2250.7728.v17.n2.18193](https://doi.org/10.37603/2250.7728.v17.n2.18193)

Vásquez-Fabián SA, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Campos-Angeles GV, Santana-Flores A (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 4:164-172.

Uribe Salas JA (1993). La explotación del cobre en la Nueva España. *Ciencia Nicolaita* 4:45-60.

Uribe Salas JA (1996). Minería del cobre en el occidente del México prehispánico: un acercamiento historiográfico. *Revista De Indias* 56:297-332. [Doi:10.3989/revindias.1996.i207.807](https://doi.org/10.3989/revindias.1996.i207.807).

Zamora V (2003). El conocimiento de los metales y su beneficio por los indígenas. *Acta Universitaria* 13(1):36-48.

Zhang S, Yang Y, Storozum M, Li H, Cui Y, Dong G (2017). Copper smelting and sediment pollution in Bronze Age China: A case study in the Hexi corridor, Northwest China. *CATENA* 156:92-101. [doi:10.1016/j.catena.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.001).

# *Ciencia Nicolaita*

## **Normas editoriales**

Sólo se recibirán materiales originales, inéditos, exclusivamente postulados, en español o inglés, que hagan una aportación relevante al conocimiento de las ciencias físicas, de la vida, matemáticas, químicas, de la salud, ingenierías y arquitectura que en ningún modo difieran de la práctica editorial de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, estipulada en su normativa editorial y vigilada de manera permanente por el Comité Editorial de Ciencia Nicolaita y el Consejo Editorial de la UMSNH.

Las propuestas de contribuciones deberán cumplir con lo siguiente:

**1.-** El manuscrito siempre **deberá estar acompañada con una CARTA AL EDITOR**, indicando el tipo de contribución que se propone:

- a.- Volúmenes Monográficos** relacionados con las áreas del conocimiento mencionadas y a una **CONVOCATORIA ESPECÍFICA**.
- b.- Artículos extensos** con datos científicos originales que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión
- c.- Artículos de Revisiones** del trabajo científico de investigadores nicolaitas o de externos por invitación
- d.- Artículos de análisis** y debates científicos actuales.
- e.- Reseñas** de temas relevantes obtenidas a partir de obra (libros), entrevistas, congresos y simposios nacionales e internacionales.
- f.- Artículos de educación** de cada área científica con referencias críticas en el desarrollo de técnicas o materiales de enseñanza.
- g.- Noticias** de la comunidad científica universitaria (premios, congresos, patentes, logros).

**2.-** La presentación del **primer manuscrito deberá ser en formato PDF**, a doble espacio con fuente Times New Roman de 12 puntos. La extensión de los artículos propuestos en general no podrá sobrepasar las 25 cuartillas, y 7 figuras como máximo, incluyendo datos del autor (nombre, adscripción institucional, dirección profesional, correo electrónico, teléfono de contacto e identificador ORCID. Todas las colaboraciones deben contar con un título y resumen en español y otro en inglés (incluidos el título y las palabras clave) que no supere las 120 palabras, además de máximo 5 palabras clave en ambos idiomas.

**3.- Las ilustraciones, gráficas, cuadros y tablas se enviarán intercaladas después de su primera mención en el texto en el lugar que corresponda.**

**4.- EN CASO DE SER ACEPTADO EL MANUSCRITO, las ilustraciones, gráficas, cuadros y tablas se podrán enviar por separado** (formatos tiff o jpg a 300 dpi como mínimo), en un archivo “Lista de Figuras y Tablas” (Caption Figures) numerados consecutivamente, o bien incluir figuras de alta calidad en el texto en Word después de su primera mención, las tablas serán incluidas en formato de Word y no como imágenes.

5.- Los textos destinados a la **sección de reseñas y noticias** no podrán exceder las 5 cuartillas, ni comentar libros o artículos que hayan sido publicados hace más de tres años o que no cuenten con ISBN. Los autores de este tipo de colaboraciones deberán incluir una referencia bibliográfica detallada de la obra (autor, título, lugar de edición, editorial, colección, número de páginas e ISBN).

6.- Todo el material del manuscrito (texto y figuras) deberá subirse directamente a la plataforma OJS3/PKP y en paralelo **TAMBIÉN enviar la misma versión** digital a la dirección de correo electrónico: [ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx](mailto:ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx)

## 7.- Referencias

Las **referencias a artículos** respetarán el siguiente modelo:

Apellido(s), nombre(s) abreviado seguidos por un punto, fecha, título seguido por una coma, seguido por el nombre de la revista o editorial en *itálicas* sin abreviación, seguido por el número de páginas, p. o pp. Si la referencia cuenta con el registro se deberá indicar el ISSN e incluir el DOI.

*Ejemplo:* Fitz-Díaz E, Lawton TF, Juárez-Arriaga E, Chávez-Cabello G (2018). The cretaceous-paleogene Mexican orogen: Structure basin development, magmatism and tectonics: *Earth Science Reviews* 183: 56–84.

Para las **referencias a libros o capítulos de libro** se seguirá una regla similar a los artículos, pero en este caso se deberá indicar en *itálica* la Editorial y se deberá indicar el ISBN.

*Ejemplo:* Fegley E (2013). Practical chemical thermodynamics for geoscientists: *Amsterdam, Academic Press (Elsevier), p. 674. ISBN: 9780128102701.*

**Capítulos de libro:** Apellidos, nombre(s) abreviados, fecha entre paréntesis, título en letra normal entrecomillado, nombre del autor o autores de la obra colectiva (libro), título de la obra en *itálicas*, lugar de edición, editorial, año de edición y páginas que comprende el capítulo. Se deberá indicar el ISBN.

**Las referencias de tesis** deben comprender lo siguiente:

Nombre y apellido(s) del autor (si lo hay), fecha, título, nombre de la Institución en *itálicas*, señalar el grado de la tesis, indicar si incluye mapas o material audiovisual, seguido por el número de páginas.

*Ejemplo:* Gómez-Rivera FJ (2019). Análisis petrológico e isotópico del Complejo Batolítico Aquila, suroccidente de México: Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en Geociencias, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, Pp.103.

Las **referencias hemerográficas** deben comprender lo siguiente:

Nombre y apellido(s) del autor (si lo hay), título abreviado de la nota o artículo (si cuenta con ella), nombre de la publicación en *itálicas*, lugar de impresión, fecha, p. o pp., seguido por el

número de páginas.

*Ejemplos:* Rafael Nieto Compeán, “Lo que México podría hacer”, *Excélsior*, Ciudad de México, 19 de septiembre de 1921, p. 2A; Sin autor, “La delincuencia en su apogeo”, *El Globo*, Ciudad de México, 23 de febrero de 1925, pp. 1-2.

Las **referencias electrónicas** observan la misma lógica y se integran como sigue:

Apellido(s) y nombre (s) del autor o de la entidad responsable, título en letra normal entrecomillado, título del portal, dirección electrónica y fecha de consulta entre corchetes.

*Ejemplo:* The United Nations Office at Geneva (Library & Archives), “Mandate of the Institutional Memory Section”, [http://www.unog.ch/80256EE60057D930/\(httpPages\)/555411BC07897556C1257C85004A5725?OpenDocument](http://www.unog.ch/80256EE60057D930/(httpPages)/555411BC07897556C1257C85004A5725?OpenDocument) [consultado el 14 de febrero de 2021].

**8. No se aceptará** ninguna contribución que no se ajuste a estas normas técnicas.

## **9.- Acerca de la Revisión**

Todos los artículos serán enviados a dictamen doble ciego con especialistas externos y/o extranjeros (el formato de dictamen es público y puede consultarse en el sitio electrónico de la revista), cuyo resultado será sancionado por el editor de la publicación, quien, a través de un tercer dictamen, en el caso de ambigüedad o controversia, podrá determinar, solo o en compañía del Comité Editorial, el resultado del procedimiento. El Comité Editorial y el editor de la revista se reservan el derecho de solicitar modificaciones no previstas en los dictámenes para aprobar la publicación de estas colaboraciones. El autor será notificado del resultado de los anteriores en un periodo no mayor a dos meses.

**10.-** Todos los autores recibirán un ejemplar de la edición en formato PDF y al aceptar su publicación se acepta de manera implícita y legal otorgar los derechos de reproducción de sus respectivas colaboraciones a la revista *Ciencia Nicolaita* y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a fin de que puedan ser editadas, publicadas y difundidas tanto en versión impresa como electrónica.

**11.-** El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja en modo alguno el punto de vista de la Revista *Ciencia Nicolaita* o de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## **Artículos aceptados**

Después del proceso de arbitraje, el dictamen sobre la aceptación o rechazo del trabajo será comunicado por el Editor al autor responsable, con las indicaciones correspondientes que sustenten la decisión emitida.

## Página legal y créditos

**CIENCIA NICOLAITA**, año 33 no. 94, agosto de 2025, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 7436, 443 327 2366, y 443 322 3500, <http://www.cic.cn.umich.mx>, [ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx](mailto:ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx). Editor: Dr. José López Bucio. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2, Av. Francisco J. Mújica s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36 y Fax 443 327 23 66. Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Fidel Anguiano Rodríguez, fecha de última modificación, agosto de 2025.

Ciencia Nicolaita No. 94 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

### Imagen de la portada

**Descripción:** Lipid droplets, double staining confocal microscopy.

### Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP.